

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА
ШЕВЧЕНКА**

ННЦ «Інститут біології та
медицини» Кафедра біології
рослин

Завідувач кафедри проф. Таран Н.Ю.

Протокол №17 засідання
кафедри від “23” травня
2022р.

**ПЕРСПЕКТИВНІ ВИДИ ДЕРЕВНИХ НАСАДЖЕНЬ ДЛЯ
ОЗЕЛЕНЕННЯ УРБОПРОСТОРІВ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН**

Кваліфікаційна робота бакалавра
денної форми навчання
за спеціальністю «Садово-паркове
господарство»
Зименко Аеліти Миколаївни

Науковий керівник від кафедри
Доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри біології рослин,
Таран Н.Ю.

Робота виконана на кафедрі біології рослин ННЦ «Інститут
біології та медицини» під керівництвом Таран Н.Ю.

Оцінка захисту роботи

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
1. ВВЕДЕННЯ	5
1.1. Мета дослідження	8
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	10
2.1. Міський клімат	10
2.2. Міська рослинність	11
2.3. Дерева під впливом стресу: стресові фактори та кліматична стійкість	17
3. КЛІМАТИЧНІ ПРОГНОЗИ ДЛЯ РЕГІОНІВ ТЕМАТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	28
3.1. Проектування регіональних кліматичних змін за допомогою ансамблю EURO-CORDEX	28
3.2. Обговорення прогнозованих кліматичних змін	36
4. ПОСУХОСТІЙКІСТЬ І ЖАРОСТІЙКІСТЬ ОКРЕМИХ ПОРІД ДЕРЕВ	44
4.1. Огляд порід дерев	44
4.2. Стійкість до посухи та теплового стресу	48
4.3. Порівняння допусків порід дерев	71
4.4. Сучасний стан досліджень	81
5. АНАЛІЗ ТА ОБГОВОРЕННЯ	86
5.1. Рекомендації щодо вибору міських порід дерев	86
5.2. Місцеві та немісцеві види та нові походження	89
5.3. Оцінка придатності видів з біокліматичними оболонками	91
5.4. Рекомендації щодо досягнення найкращих переваг для міських територій	96
5.5. Обговорення питань дослідження та перспективи на майбутнє	97
6. ВИСНОВОК	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	107

Анотація

Міські зелені насадження забезпечують комфортне існування людини в умовах урболандшафтів. Дерева – основні складові парків і міського ландшафту багатьох міст – мають найбільшу користь, якщо вони здорові та життєві. Вони забезпечують киснем повітря, покращують мікрокліматичні умови, формують рекреаційну та естетичну цінність зеленої інфраструктури міста. Проте умови зростання дерев в урбопросторах є більш складними, ніж у природному ландшафті, це пов'язано зі зміною мікрокліматичних умов, надлишковим теплом в щільно забудованих ландшафтах, запиленістю, обмеженою доступністю води, засміченістю солями важких металів, низькою якістю ґрунту, поширеністю хвороб. Крім того, зміни клімату посилюють стресове навантаження на міські дерева через критичні температурні фактори та лімітоване водозабезпечення рослин, до яких деякі види не достатньо пристосовані. Для підбору асортименту рослин та комфортного існування людини в зелених міських просторах створена програма EURO-CORDEX для аналізу потенційних впливів зміни клімату в трьох кліматично різних регіонах Німеччини у 2050-х роках (2036-2065 pp.) щоб практикуючі фахівці зеленої індустрії були готові до низки можливих змін і здійснювали відбір видів деревних порід достатньо пристосованих до стресових ситуацій майбутніх урболандшафтів.

Метою даної роботи було ознайомитись з дослідженнями, проведеними за програмою EURO-CORDEX, для використання досвіду відбору стійких до кліматичних ризиків деревних порід характерних для міських просторів Європи та України. Охарактеризувати перспективні види дерев стій

Робота викладена на 127 сторінках, містить 4 рисунків, 3 таблиці

Ключові слова: стрестолерантність, деревні породи, урбопростори, зміни клімату.

1. ВВЕДЕННЯ

Майбутні наслідки зміни клімату більше не можна ігнорувати. Тому адекватна адаптація до очікуваних змін потрібна практично в усіх сферах нашого життя (Noble et al. 2014). AR5 IPCC визначає адаптацію як «процес пристосування до фактичної чи очікуваної зміни клімату та її наслідків. У людських системах адаптація спрямована на пом'якшення чи уникнення шкоди чи використання корисних можливостей. У деяких природних системах втручання людини може сприяти адаптації до очікуваного клімату та його ефекту». (Агард та ін. 2014: 1759). Враховуючи, що міста є домом для все більшої частки світового населення і утворюють центри економіки, адаптація набуде особливого значення в міських районах (EEA 2012a). Сьогодні три чверті населення Європи проживає в містах і буде стикатися з різноманітними кліматичними впливами (World Bank 2014, EEA 2012a). З 75% міського населення у 2013 році, цей розвиток також можна побачити в Німеччині (Світовий банк 2014). Оскільки тенденція до урбанізації триває, у майбутньому ще більша частка населення буде жити в містах.

Німеччина складається з кліматично відмінних регіонів від більш морського північного заходу до більш континентального південного сходу. Клімат великого масштабу додатково змінюється топографією (DWD 2015a, Schuchardt et al. 2008). Як пише Umweltbundesamt (2015) та Jacob et al. (2014) показали, що прогнозовані зміни клімату в Німеччині є регіональними та сезонними різноманітними. Тому загальні заяви про очікувані зміни для всієї країни можливі лише з обмеженнями. Підсумовуючи, можна сказати, що щодо середньої температури повітря (річні та сезонні літні/зимові значення) прогнозуються тенденції підвищення для всієї країни, проте регіональні та сезонні відмінності у величині змін існують. Крім того, прогнозується, що спекотні дні та тропічні ночі будуть частішими. Прогнозовані зміни кількості опадів є ще більш неоднорідними в просторі та часі, включаючи тенденції в обох напрямках залежно від регіону та розглянутих часових рамок (річні або сезонні літні/зимові значення). Очікується, що літні посушливі періоди

зростуть по всій Німеччині із просторовими відмінностями у величині змін (Umweltbundesamt 2015). Через можливе поєднання засушливих періодів і хвиль спеки, очікується підвищений ризик посухи влітку (Європейська комісія 2009).

У порівнянні з сільською місцевістю, міський клімат характеризується більш високою температурою навколишнього повітря, відомим як ефект міського теплового острова, нижчою відносною вологістю, зниженою швидкістю вітру, а також підвищеним забрудненням повітря (Doick & Hutchings 2013, Kleerekoper et al. 2012, Heidt & Neef 2008, Kuttler 2008, Oke 1988). Проблеми виникають через те, що високі температури та забруднення повітря, як відомо, негативно впливають на суспільне здоров'я та добробут людей (Kleerekoper et al. 2012, Mavrogianni et al. 2011, Matzarakis & Amelung 2008). Очікується, що мікрокліматичні умови в міських районах, які вже сьогодні є напруженими, ще більше погіршаться під впливом зміни клімату в майбутньому (Gill et al. 2014). На додаток до зростання відсотка людей, які проживають у містах, демографічні зміни призводять до збільшення частки літнього населення, яке особливо вразливе до спеки. Тому терміново необхідна адаптація до майбутніх умов, щоб забезпечити здорові умови життя в містах (EEA 2012a). Однією з можливостей є використання міської зеленої інфраструктури, яка включає парки, зелені насадження, сади, зелені дахи або стіни, а також рослинність вздовж вулиць (Demuzere et al. 2014, Gill et al. 2014, Wittig et al. 2014, EEA 2012a). У літературі широко визнається, що рослинність може покращувати міський мікроклімат, зменшуючи перегрів міських територій та зменшуючи забруднення повітря (Demuzere et al. 2014, Doick & Hutchings 2013, Kleerekoper et al. 2012). Таким чином, міські зелені є одним з варіантів адаптації до впливу зміни клімату.

Здорова рослинність має найвищі економічні, соціальні та мікрокліматичні переваги (Gillner et al. 2014). З цієї причини добре адаптовані породи дерев зазвичай приносять більші переваги, ніж види, які не можуть впоратися з міським середовищем і, отже, не можуть повністю розвинути

свій потенціал (Gillner et al. 2013). Теоретично, для ефективного впровадження заходів з адаптації до зміни клімату необхідні адекватні методи управління зеленими насадженнями, комплексне міське планування та ретельний відбір видів. Як правило, дерева в міському середовищі вже стикаються з більш суворими умовами, ніж лісові дерева через ущільнення ґрунту, знижену доступність води, змінені мікрокліматичні умови та характер вітру, обмежений простір для коренів, механічні пошкодження та забруднення солі (Gillner et al. 2014). Незважаючи на те, що в цілому паркові дерева відчують більш сприятливі умови, ніж дерева вздовж вулиць або в контейнерах, їм все одно доводиться впоратися з більш складними умовами, ніж дерева в природному середовищі (Sæbø et al. 2005). Оскільки в умовах зміни клімату очікуються сухіші літні умови та вищі температури, для і без того стресових міських дерев виникають додаткові проблеми (Roloff et al. 2009).

При цьому велике значення мають інші фактори міського зеленого планування, напр. відбір дерев з високою естетичною цінністю або використання достатньо великої кількості різних порід, щоб уникнути монокультур, які більш схильні до зараження шкідниками та хворобами (Roloff 2013a). Однак на практиці доводиться стикатися з факторами або обмеженнями, що впливають на подальший розвиток, під час створення або управління міською зеленню, напр. грошові обмеження, наявність заводів, вимоги до технічного обслуговування, специфікації асоціацій або державних органів, а також включення місцевих традицій або особистих уподобань (Chen & Jim 2008, Ottitsch & Krott 2005). У зв'язку зі зміною клімату перед практикуючими спеціалістами, окрім існуючих міркувань, постане додаткова проблема, яка стає все більш важливою: вибір деревних порід для міських парків, які будуть найбільш придатними в майбутньому, враховуючи регіональні та місцеві кліматичні умови. Відповідно, у цій дисертації досліджуються два основних аспекти, які є важливими для відбору видів: аналіз майбутніх умов зміни клімату, прогнозованих ансамблем регіональних

кліматичних моделей, а також толерантність вибраних порід дерев до стресу від спеки та посухи.

1.1. Мета дослідження

У цьому дослідженні три кліматично різні регіони Німеччини аналізуються на предмет очікуваних кліматичних змін у найближчому майбутньому, які також називають 2050-ми (2036-2065 pp.). Аналіз базується на ансамблі регіональних кліматичних моделей ініціативи EURO-CORDEX. Основна увага приділяється прогнозованим змінам частоти та тривалості хвиль спеки та засухи влітку, тобто протягом вегетаційного періоду (травень – вересень). По-друге, десять видів широколистяних дерев відібрано на основі дослідження рослинності в міському парку у Фрізойте, Нижня Саксонія. Вони аналізуються на відповідну стійкість до посухи та спеки або чутливість на основі всебічного огляду літератури. Метою цього аналізу є оцінка майбутньої придатності деревних порід для регіонів тематичного дослідження за мінливих кліматичних умов з акцентом на змінах посушливих періодів та хвиль спеки. Придатність видів відповідно до зимостійкості, сприйнятливості до шторму та інших критеріїв, релевантних у міському контексті (наприклад, естетична цінність та алергенний потенціал), виключені з аналізу, але важливі для остаточних рішень щодо містобудування.

Поки що існують різні класифікації толерантності та чутливості до посухи чи спеки. Подальші підходи до класифікації зосереджуються на споріднених характеристиках, напр. придатність для сухих місць проживання або здатність адаптуватися до стресу від посухи. Ця дипломна робота спрямована на об'єднання, порівняння та стандартизацію існуючих схем класифікації. На наступному кроці доступна інформація для десяти відібраних видів має бути об'єднана в загальну оцінку їх стійкості та чутливості до посухи та спеки. Результати призначені для визначення найкращих кліматичних порід дерев для трьох німецьких випробувальних полігонів з огляду на прогнозований кліматичний стан у 2050-х роках.

Питання придатності деревних видів за кліматичних умов, що змінюються, знаходиться в стадії поточних досліджень (Böll et al. 2014, Gillner et al. 2014, Gillner & Roloff 2011, Kölling et al. 2009a, Roloff et al. 2009). У цій роботі використовується найсучасніша кліматична інформація в поєднанні з наявними даними про вибрані породи дерев, включаючи наукові, рецензовані публікації, звіти з практики та бази даних, напр. для власників лісів або інших практиків. Тому можливі прогалини в інформації про породи дерев та потреби в подальших дослідженнях також будуть усунені.

Наступні питання узагальнюють мету дослідження:

- 1. Які наслідки зміни клімату прогнозуються для вибраних регіонів Німеччини на 2050-ті (2036-2065 pp.)?*
- 2. Яким чином на десять відібраних порід дерев загалом вплинуть посухи та хвилі спеки, і що означають ці результати щодо впливу зміни клімату в регіонах, що досліджуються?*
- 3. Погляд на майбутнє: в умовах зміни клімату, чи є потреба замінити всі популярні породи дерев, які зараз характеризують наше місто?*

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

2.1. Міський клімат

Широко визнаним фактом є те, що забудова та діяльність у міських районах впливають як на регіональні, так і на мікрокліматичні умови (Kleerekoper et al. 2012). Явищем, яке найчастіше описується в цьому контексті, є міський острів тепла (UHI), який характеризується більш високою температурою навколишнього повітря в порівнянні з сільською місцевістю. Вхідне сонячне випромінювання поглинається будівельним матеріалом, виділяється у вигляді довгохвильового випромінювання, і в поєднанні з антропогенними тепловими викидами викликає градієнт температури сільсько-міський (Kuttler 2008, Memon et al. 2008). Різниця температур найбільш виражена в нічний час (Doick & Hutchings 2013). Вона досягає в середньому від 1 °C до 4 °C, але може досягати 9 °C в екстремальних ситуаціях, напр. під час хвиль спеки або в особливо щільних частинах міста (Doick & Hutchings 2013, Heidt & Neef 2008). Крім того, міські райони характеризуються нижчою відносною вологістю, ніж сільські райони, що спричинено зниженням випаровування, підвищеним забрудненням повітря, високим запасом тепла будівельного матеріалу, а також зміненим режимом вітру та зниженою швидкістю вітру через перешкоди для будівництва (Kleerekoper et al. 2012, Куттлер 2008).

Основною причиною зміни біокліматичних умов є зміна енергетичного балансу в результаті заміни природних зелених насаджень і рослинності герметичними поверхнями та будівлями. Крім того, антропогенні викиди погіршують ситуацію (Doick & Hutchings 2013, Kleerekoper et al. 2012, Chen & Jim 2008, Heidt & Neef 2008, Kuttler 2008, Wittig 2008, Larcher Oke8, 2009). Більш детальне обговорення причин і наслідків міського острова тепла надано, серед іншого, Doick & Hutchings (2013), Kleerekoper et al. (2012), Memon et al. (2009), Heidt & Neef (2008), Kuttler (2008) та Memon et al. (2008). Як правило, підвищена температура може мати серйозні негативні наслідки для здоров'я населення та теплового комфорту людини. Нещодавні екстремальні спеки, такі як хвиля спеки в 2003 році, призвели до збільшення

смертності від спеки (Doick & Hutchings 2013, Kleerekoper et al. 2012, Mavrogianni et al. 2011, Matzarakis & Amelung 2008). Це яскравий натяк на важливість створення комфортних і здорових умов життя в наших містах.

2.2. Міська рослинність

2.2.1. Міська рослинність у контексті адаптації до зміни клімату

Серед інших технічних і нетехнічних заходів для адаптації до зміни клімату в містах, які обговорюються, напр. ЕЕА (2012) та Kleerekoper et al. (2012), міський зелений забезпечує значне покращення мікроклімату та явну користь для благополуччя людей (Kleerekoper et al. 2012, Dimoudi & Nikolopoulou 2003). При розумному використанні міська рослинність може знизити високі літні температури повітря і тим самим послабити ефект міського теплового острова (Dimoudi & Nikolopoulou 2003). Міська зелень включає парки, менші громадські зелені насадження, приватні сади, вуличні дерева та зелені фасади та дахи (Kleerekoper et al. 2012). У літературі термін «міський ліс» часто використовується для опису всіх міських дерев, незалежно від того, чи ростуть вони як окремі дерева вздовж вулиці чи в міських лісах. 8 Крім того, термін «зелена (міська) інфраструктура» (GUI) часто використовується для опису заходів та втручань, які використовують рослинність для забезпечення переваг людини та екосистеми (Demuzere et al. 2014, Revi et al. 2014).

Рослинність забезпечує охолодження кількома способами, а саме транспірацією рослин, випаровуванням, затіненням поверхонь та відбиттям випромінювання (Doick & Hutchings 2013, Kleerekoper et al. 2012). Дереву особливо важливі для затінення та перехоплення опадів (Gill et al. 2014, Bowler et al. 2010). Дорослі дерева також ефективні для охолодження в сухих умовах, оскільки вони висихають повільніше, ніж трава, і, отже, можуть забезпечити охолоджуючий ефект протягом більш тривалого періоду (Gill et al. 2014). У літературі повідомлялося про різні кількісні ефекти охолодження. За даними Doick & Hutchings (2013), зелена інфраструктура може спричинити

зниження температури повітря з 2°C до 8°C. Dimoudi & Nikolopoulou (2003) пропонують зниження температури повітря на 0,8 K при збільшенні відношення зеленого до площі забудови на 10 %. Міські парки можуть діяти як «прохолодні островці парку» (PCI) у більш теплому місті (Kleerekoper et al. 2012). Боулер та ін. (2010) повідомляють за даними спостережень, що парки були в середньому на 1 °C прохолодніше, ніж навколишнє. Kleerekoper та ін. (2012) навіть вказують на ефект охолодження від 1 до 4,7 °C, який може поширюватися на кілька сотень метрів за межі парку на сусідні території. Однак ефект розповсюдження сильно залежить від характеру повітряних потоків у межах міста та рясного водопостачання паркової рослинності. Як правило, дослідження показали, що більші парки були прохолоднішими, ніж менші зелені насадження (Bowler et al. 2010). Оскільки багато місцевих факторів відіграють роль у ефекті парку, Боулер та ін. (2010) вказують на необхідність подальших досліджень конкретних переваг різних заходів.

Крім того, зниження зовнішньої температури одночасно зменшує потребу будівлі в енергії для охолодження, що знову зменшує викиди для використання електроенергії кондиціонером (Chen & Jim 2008). Збільшення частки зеленої інфраструктури в місті зазвичай отримує широке визнання громадян, оскільки міські дерева та парки помітно покращують умови життя. Однак для забезпечення ефективної евапотранспірації необхідне достатнє водопостачання для рослинності (Kleerekoper et al. 2012). Таким чином, перевага міської зелені найбільша при оптимальному водопостачанні. З іншого боку, рослинність не тільки допомагає пристосуватися до спеки. Це збільшує водну буферну здатність території, що допомагає зменшити наслідки міських повеней після сильних дощів. Тому зелену інфраструктуру та управління дощовими водами слід розглядати як комбінацію (Kleerekoper et al. 2012). Крім того, міська зелень пропонує ряд інших переваг, зокрема покращення якості повітря за рахунок зменшення забруднення повітря, зменшення атмосферного CO₂, покращення якості води, зменшення ерозії,

збільшення біорізноманіття та соціально-економічних переваг, таких як рекреаційна, психологічна та освітня цінність (Demuzere et. ін. 2014, Шмідт 2014, Берланд 2012, Лейзінгер та ін. 2010, Ескобедо та Новак 2009, Кьезура 2004). Більш детальне обговорення екосистемних послуг, які надають міські ліси, опубліковано, напр. Чен і Джим (2008).

Крім усіх позитивних ефектів, слід пам'ятати про небажані побічні ефекти та компроміси між цими різними перевагами. Вуличні дерева можуть, наприклад, створювати тінь і охолоджувати навколишнє середовище, в той час як, з іншого боку, перекриваючи повітряні шляхи та затримуючи забруднювачі під своїм пологом на рівні вулиці, якщо вони висаджені в неправильних місцях. Демузере та ін. (2014) наголошують на важливості ретельного міського планування, щоб уникнути компромісів і прагнути отримати супутні вигоди. Крім того, якість міської зелені – і, отже, її користь – залежить від розміру, розташування, видового складу, їх стресостійкості, а також від зв'язку та розподілу різних типів рослинності в масштабах міста (Heidt & Neef 2008). Крім того, слід згадати деякі негативні аспекти, такі як алергенний потенціал, викид летких органічних сполук (ЛОС), які беруть участь у утворенні озону, витрати на технічне обслуговування та витрати, пов'язані з пошкодженням інфраструктури (наприклад, через коріння дерев) (Escobedo & Nowak 2009). Проте, як зазначає Берланд (2012), все ще вигідно інвестувати в міську зелень, оскільки загальні вигоди переважають витрати на управління.

2.2.2. Міські дерева – виклики та вимоги

Міські дерева повинні справлятися з великим спектром додаткових навантажень, які є менш сильними або відсутні в лісах. Це пояснюється тим, що екологічні умови в місті загалом є більш екстремальними та шкідливими для дерев і можуть спричинити втрату життєвих сил і підвищити ризик смертності (Gillner et al. 2014). Серед інших факторів, дерева доводиться стикатися з ущільненням ґрунту, поганою якістю ґрунту, обмеженим об'ємом ґрунту, забрудненням ґрунту та повітря, забрудненням сіллю, надлишковим теплом, механічними пошкодженнями, вандалізмом, локальними поривами вітру, зміненням рівнем підземних вод, зниженим вмістом поживних речовин у ґрунті, зниження доступності води, а також стрес від посухи (Böll et al. 2014, Forman 2014, Schmidt 2014, Wittig 2008, Benedikz et al. 2005, Sæbø et al. 2005). На рис. 1 показані природні фактори, які змінюються в міському середовищі порівняно з лісовими екосистемами, а також додатковий вплив людини, що впливає на міські дерева. Як правило, умови стають суворішими зі зменшенням близькості до природи (Roloff 2013a). Міські ліси, напр. піддається відносно низьким рівням стресу і демонструє відносно високу довговічність дерева. З іншого боку, дерева вздовж вулиць або в контейнерах піддаються дуже сильному стресу. Отже, ці дерева не досягають старості. Дерева в парках знаходяться між цими крайнощами і повинні справлятися з більш помірним стресом порівняно з вуличними деревами, але все одно з більш суворими умовами, ніж міські ліси (Sæbø et al. 2005). Тому дерева, які підходять для міських парків, не обов'язково підходять для плантації вздовж вулиці (Roloff 2013a).

Ця робота зосереджується на двох проблемах для міських дерев, а саме на стресі від посухи та на тепловому стресі. Стрес від посухи в міських районах зазвичай виникає через обмежену доступність води через збільшення поверхневого стоку та/або зниження рівня ґрунтових вод, тоді як тепловий стрес виникає через ефект міського теплового острова та надлишкового

тепла, що повертається від будівель (Böll et al. 2014, Шенфельд та ін., 2011, Віттіг, 2008). Крім того, високі температури посилюють умови посухи, збільшуючи потребу в випаровуванні навколишнього повітря. Обидва стреси можуть посилюватися в ході прогнозованих кліматичних змін (див. розділ 2.4). Додатковим фактором, яким не можна нехтувати, є вплив травоядних тварин, шкідників та патогенів (Форман 2014). Більш тепле і сухе міське середовище є середовищем існування для інвазивних шкідників і патогенів, для яких прохолодніші сільські райони можуть бути непридатними. Дерев, які постраждали від екстремальних умов міської місцевості, більш схильні до зараження (Böll et al. 2014).

Бенедікз та ін. (2005) поділяють міські дерева на три категорії: вуличні дерева, паркові дерева та ділянки лісу в межах міста або на периферії. Вибираючи породу дерев для міського середовища – чи то для великих парків, невеликих зелених насаджень чи вуличних дерев – потрібно враховувати кілька факторів у всіх місцях: стійкість до спеки та посухи, вимоги до ґрунту, зимостійкість, а також шкідники, хвороби, і стійкість до забруднення. Ступінь цих напружень може відрізнятися від місця до місця (Doick & Hutchings 2013). На додаток до їхніх екологічних вимог, інші фактори мають таке ж значення в міському контексті, такі як естетична цінність, алергічний потенціал, ризик розриву вітру, опадання листя або фруктів, токсичність, затінення та чутливість до штучного світла (Roloff 2013a). Однак не всі критерії об'єктивні. Естетична цінність, наприклад, також є питанням особистих уподобань. Тим не менш, деякі критерії необхідно враховувати, оскільки вони впливають на безпеку дорожнього руху на безпеку пішоходів (наприклад, ризик поломки або падіння фруктів) (Roloff 2013a). Розширений список критеріїв можна знайти в Roloff (2013a).

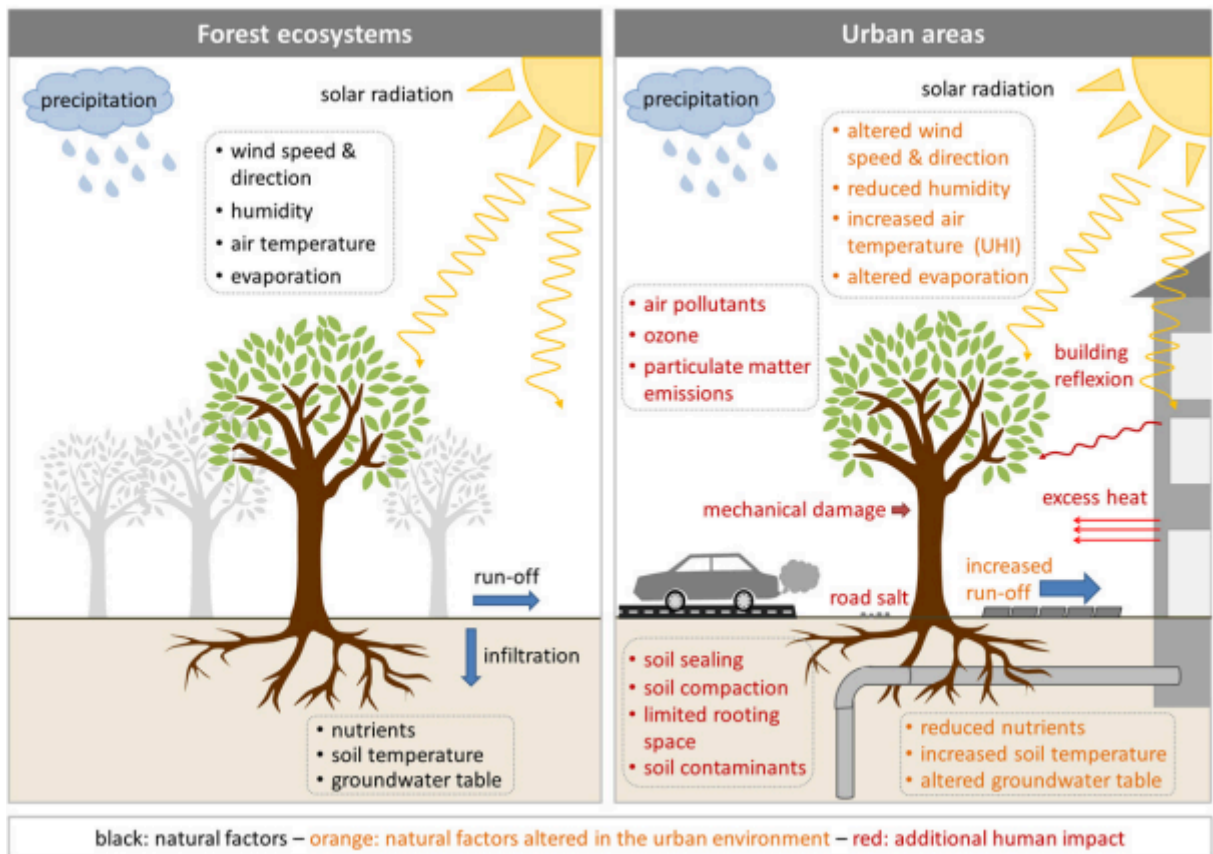


Рис. 1 Впливи на міські дерева в порівнянні з лісовими деревами. На міські дерева впливають природні фактори (деякі з них змінені впливом людини) та додатковий вплив людини в міських районах порівняно з лісовими екосистемами (джерело: М. Бруне, (2016): Міські дерева в умовах зміни клімату. Потенційні наслідки засухи та спеки у трьох німецьких регіонах у 2050-х роках. Звіт 24. Центр кліматичного обслуговування Німеччини, Гамбург).

2.3. Дерева під впливом стресу: стресові фактори та кліматична стійкість

2.3.1. Поняття стресу

Теше (1992: 279) описує стійкість до клімату як «стійкість рослин проти виняткового стресу через погодні умови, такі як температура, екстремальна посуха, перезволоження ґрунту, радіація тощо». Біотичні стреси включають хвороби, травоядність, конкуренцію та паразитизм. Абіотичні фактори включають, серед іншого, температуру, доступність води, радіацію, хімічні впливи та механічні навантаження, такі як вітер або рух ґрунту (Schulze et al. 2005). У цій дипломній роботі розглядаються лише стресові фактори спека та посуха. Спека і посуха протягом вегетаційного періоду викликають стрес для багатьох видів дерев у помірній зоні. Це змушує рослини реагувати, адаптуючись до стресу, доки стрес не стане надто серйозним і не завдасть серйозної шкоди (Roloff 2013a).

«Толерантність до фактора навколишнього середовища» була визначена Сімсом (2000: 563) як «здатність підтримувати фізичну форму в умовах стресу, спричиненого цим фактором». Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), толерантність також означає здатність протистояти стресу, не зазнаючи серйозних, незворотних пошкоджень. На відміну від толерантності, чутливість до стресу від спеки або посухи в цій дисертації розуміється як нездатність підтримувати фізичну форму під час стресу або як наслідок виникнення незворотних пошкоджень, відповідно. Згідно з Ролоффом (2013b: 83), дерево пристосоване до певних умов середовища, якщо воно «може впоратися зі своїм середовищем, яке може бути змінним до певної міри». З іншого боку, «популяція дерев або дерев є адаптивною, якщо вона також може впоратися з більшими змінами умов навколишнього середовища протягом тривалого періоду часу, наприклад. тривале підвищення температури повітря» (Roloff 2013b). Разом ці дві риси формують потенціал адаптації.

У разі стресових умов рослини скоріше інвестують у збереження свого поточного стану без пошкодження, замість того, щоб сприяти подальшому

зростанню (Teschke 1992). Ступінь стресу для рослини залежить від інтенсивності, моменту часу та тривалості стресу, а також від здатності рослини адекватно реагувати. Інші внутрішні та зовнішні фактори, такі як комбінація різних напруг, можуть додатково впливати на вплив стресора (Roloff 2013a, Larcher 2001, Tesche 1992). Оскільки дерева закріплені на своєму місці і можуть досягати великого віку, вони піддаються ряду стресових факторів і розробили різні механізми для захисту від пошкоджень, спричинених стресом (Roloff 2013a, Roloff 2010). Ці механізми, які використовуються рослинами для подолання стресових умов, часто поділяють на «уникнення», тобто анатомічні або морфологічні механізми захисту, які служать для уникнення або затримки деформації, і «толерантність», тобто перенесення стресу через коригування фізіологічних процесів (Schulze et. ін. 2005, Теше 1992). Зверніть увагу, що позначення «толерантність» і «толерантний» використовуються в ході цієї дипломної роботи згідно з визначенням Сіммса (2000), згаданим вище. Ці терміни не означають таких механізмів толерантності на відміну від механізмів уникнення. Замість цього вони просто визначають здатність дерева підтримувати фізичну форму під час стресу. Під час роботи з тривалим стресом дерева проходять процес, що включає фазу тривоги (дестабілізація, можливі гострі пошкодження, якщо стрес занадто сильний), фазу опору (регенерація до нормального стану внаслідок адаптаційних процесів) і фазу виснаження (перенапруження адаптаційних можливостей).). Якщо стрес занадто інтенсивний і / або триває занадто довго, виникають постійні пошкодження. Тим не менш, дерева все ще можуть відновитися у фазі виснаження, якщо знову зменшити стрес (Roloff 2013b, Roloff 2010, Schulze et al. 2005, Larcher 2001).

При всьому при цьому стрес не обов'язково є негативним. Позитивний, корисний «евстрес» може сприяти відновленню та змусити дерево краще адаптуватися до майбутніх фаз стресу. Навпаки, «дистрес» є шкідливим стресом, який ще більше дестабілізує або навіть руйнує організми (Roloff

2010, Niinemets & Valladares 2006, Schulze et al. 2005, Larcher 2001). Оскільки адаптація до певного стресу пов'язана з витратами для дерева, розробка толерантності до багатьох стресів є дуже складною. Якщо водні та поживні ресурси необхідні, наприклад, для збереження поточного стану без пошкодження, то менше ресурсів буде доступно для подальшого зростання (Niinemets & Valladares 2006, Tesche 1992). Залежно від типу стресу та стратегії адаптації додаткові стреси можуть посилити або послабити перший стресовий фактор. Крім того, два стреси можуть мати різний вплив залежно від того, чи виникають вони одночасно чи послідовно (Copolovici et al. 2014). У цьому контексті слід зазначити, що дуже різні стратегії можуть призвести до однакових рівнів толерантності до стресу або уникнення, і що толерантність загалом важко виміряти (Roloff & Bonn 2008).

Мікрокліматичні умови міських територій можуть спричинити схильність дерев та зробити їх більш сприйнятливими до хвороб і шкідників. Крім того, теплолюбні комахи користуються перевагою в теплішому середовищі міста (Siewniak & Kusche 2009, Roloff & Grundmann 2008a). Комах-шкідників можна розрізнити на первинних, вторинних і хронічних паразитів залежно від виду дерева, на який вони вражають. У той час як первинні паразити також вибирають здорових особин, вторинні паразити концентруються на вже ослаблених деревах, які більш схильні до зараження. Останнє може призвести до швидкого погіршення стану дерева і досить швидкого відмирання. Хронічні паразити також зосереджуються на ослаблених деревах, але роками харчуються ресурсами дерева (Siewniak & Kusche 2009).

Походження дерева та типове географічне поширення часто сприймаються як ознака кліматичних умов, за яких вид може рости (Roloff 2013b). Тим не менш, крім фізіологічної основи, толерантність також залежить від різних факторів навколишнього середовища, а також може змінюватися в залежності від віку та схильності індивіда (Siewniak & Kusche 2009, Niinemets & Valladares 2006). Цей випадок ускладнює визначення

конкретного порогу фактора, який дерево може витримати (Niinemets & Valladares 2006). Як правило, життєві дерева більш стійкі до зовнішніх впливів. Життєздатність тим вище, чим краще збігаються екологічні вимоги дерева та існуючі умови навколишнього середовища (Reif et al. 2010). У багатьох випадках все ще існують прогалини в знаннях про толерантність до первинних абіотичних стресів, особливо якщо кілька стресів виникають одночасно або послідовно (Niinemets & Valladares 2006). Однією з причин цього є те, що досі лише кілька досліджень зосереджені на впливі множинних стресів і життєдіяльності рослин, особливо коли виникають як абіотичні, так і біотичні стреси (Copolovici et al. 2014).

2.3.2. Тепловий стрес

Тепловий стрес впливає на метаболізм і життєву силу дерева (Roloff 2013b). Перегрівання відбувається в рослинах, якщо надто багато енергії, що надходить, не може вивільнитися досить швидко. Високі температури в рослинах можуть виникати через пряме сонячне випромінювання або високі температури навколишнього повітря (Larcher 2001). Герметичні поверхні в міських районах, особливо асфальт і бетон, можуть посилити тепловий стрес. Встановлено, що поверхні в помірних зонах досягають температур до 60-70 °C (Larcher 2001). На крони і листя зрілих дерев впливають менше температури поверхні, ніж на чагарники та трав'янисту рослинність, однак високі температури біля землі також можуть впливати на саджанці дерев і молоді дерева (Roloff 2010, Schulze et al. 2005, Larcher 2001). При одночасному виникненні стресу від посухи ще однією причиною перегріву є закриття продихів, щоб запобігти втраті води. У цьому випадку зменшується транспірація і необхідне охолодження листка забезпечити неможливо. Це може викликати температуру листя, яка значно перевищує температуру повітря (Bréda et al. 2006).

Зниження швидкості фотосинтезу при піковій температурі спостерігається в помірних зонах (Roloff 2013b). Наслідки температур вище допустимого порогу також включають втрату цілісності мембрани,

денатурацію ферментів з подальшою втратою функціонування ферментів і некроз тканин (Jones 2014). Листяні дерева в помірних зонах зазвичай зазнають теплових пошкоджень протягом вегетаційного періоду приблизно при $TL_{50} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (50 % пошкодження після щонайменше 30 хвилин термічної обробки) (Roloff 2010, Schulze et al. 2005). Дерева, які пристосовані до затінених місць, можуть бути пошкоджені вже при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Roloff 2010). Пору року або стадія росту можуть вплинути на те, чи зможе дерево впоратися зі стресом, чи воно пошкоджене впливом спеки (Umweltbundesamt 2015). Шульце та ін. (2005) описують приклад гібридних листків тополі (*Populus deltoidis* x *simonii*), які були пошкоджені в кінці літа, але не протягом попередніх тижнів. Одне з можливих пояснень полягає в тому, що наприкінці літа дерево може вже переходити у фазу морозного зміцнення і тому може бути більш схильним до теплового стресу. Фізіологічні реакції лісових дерев на спеку розглядаються та обговорюються більш детально в Rennenberg et al. (2006).

Дерева можуть уникнути теплового стресу за допомогою різних механізмів, включаючи форму та положення листя, тобто, відповідно, вплив прямих сонячних променів. Охолодження досягається шляхом транспірації, що призводить до втрати води, що є проблематичним, якщо водночас обмежується подача води. Тому поєднання спеки та посухи є особливо складним, тому вторинні ефекти високих температур потребують особливої уваги (Schulze et al. 2005). Аллен та ін. (2010) вказують на те, що спека та посуха в поєднанні можуть мати комплексний вплив залежно від тяжкості, тривалості та частоти обох стресів.

2.3.3. Стрес від посухи

У цьому дослідженні посушливі періоди визначаються як «періоди щонайменше п'ять днів поспіль із щоденною кількістю опадів нижче 1 мм» (Jacob et al. 2014: 566). Відповідно, день з добовою сумою опадів нижче 1,0 мм називають сухим днем. Термін посуха був визначений різними способами залежно від питання дослідження, сфери інтересів та типу впливу посухи.

Порівняння можна знайти в Bender & Schaller (2014). Визначення, що найбільше наближається до того, що мається на увазі під «посухою» у цій дисертації, — це сільськогосподарська посуха. При цьому враховується не тільки відсутність опадів, а й недостатня вологість ґрунту. Це відбувається, якщо дефіцит опадів збігається з високим випаровуванням протягом вегетаційного періоду (Bender & Schaller 2014). Початок сільськогосподарської посухи може відбутися через кілька днів після початку метеорологічної посухи через залишкову вологість ґрунту (Heim 2002). Таким чином, лише посуха не обов'язково викликає сільськогосподарську посуху; однак це може викликати умови посухи залежно від обставин. Використовуючи термін «посуха» в цій дипломній роботі, передбачається, що стрес від посухи може виникнути як наслідок сухості в поєднанні з іншими факторами. Тим не менш, у цій роботі «посуха» не використовується як синонім сухості.

Стрес від посухи часто є результатом високої сонячної радіації та низької вологості повітря, які викликають високі вимоги до випаровування та низьку доступність ґрунтової води. Інші фактори, такі як властивості вітру та ґрунту, також мають вплив (Gartner et al. 2009, Roloff & Grundmann 2008a). Високі температури збільшують випаровування через більш високий дефіцит тиску пари повітря, що знову ж таки сприяє формуванню умов посухи (Ryan 2011). Тому хвилі тепла також сприяють утворенню умов посухи і можуть серйозно посилити посуху, якщо вони збігаються з посушливими періодами. Посуха є одним з найбільш частих стресових факторів для дерев, особливо в міських районах, де доступність води знижена (Kleerekoper et al. 2012, Roloff 2010). Стрес від посухи може безпосередньо пошкодити дерево, напр. шляхом обмеження зростання, а опосередковано, напр. шляхом схильності дерев до патогенів (Roloff 2010).

Залежно від виду, у реакції на посуху можна спостерігати різні ефекти (Roloff 2013b). Як короточасний наслідок, водний потенціал ґрунту зменшується під час висихання ґрунту. Таким чином, щоб забезпечити

безперервний водний транспорт, водні потенціали в дереві мають бути відповідно відрегульовані, щоб підтримувати градієнт від коренів до крони та забезпечити поглинання води. Однак, якщо водний потенціал ксилеми знижується нижче певного порогу, може виникнути емболія, яка порушує транспортування води. Закриття продихів зменшує втрати води. Проте відбувається компроміс: поглинання CO₂ стає обмеженим, таким чином швидкість фотосинтезу зменшується, що в кінцевому підсумку призводить до вуглецевого голодування (Roloff 2013a, Roloff 2013b, McDowell et al. 2008). Крім того, закриття продихів може викликати або посилити тепловий стрес через відсутність випарного охолодження (Bréda et al. 2006). У той же час це ослаблення схиляє дерева до нападів патогенів (McDowell et al. 2008).

Якщо умови посухи зберігаються, починаються прямі пошкодження, напр. листя можуть деформуватися або опадати. Як правило, багато дерев можуть витримати кілька днів посухи. Однак води, що зберігається в стовбурі, недостатньо для тривалих періодів посухи (Roloff 2013a, Roloff 2013b). У середньостроковій перспективі листя або навіть цілі гілки скидаються, щоб зменшити загальну поверхню листя і тим самим мінімізувати втрати води через транспірацію (Roloff 2013b). До віддалених наслідків можна віднести зменшення лінійного росту і зростання в обхват, а також утворення коротких пагонів. Оскільки вода транспортується менш ефективно через короткі пагони, ризик стресу від посухи підвищується в наступні періоди вегетації (Roloff 2013b). Структура крони зазвичай нормалізується протягом кількох років після посухи. Якщо друга посуха виникає незабаром після першої, смертність збільшується через схильність. Однак безпосередня причина відмирання часто залишається незрозумілою (Roloff 2013b).

Посухостійкість — це здатність підтримувати фізичну форму під час стресу від посухи та витримувати умови посухи, не зазнаючи значних збитків (Roloff & Grundmann 2008a, Simms 2000). В основному він визначається різними морфологічними та фізіологічними ознаками (Niinemets & Valladares

2006). Рослини справляються з посухою за допомогою структурних або фізіологічних змін, або їх комбінації (Bréda et al. 2006). Морфологічні коригування включають зменшення площі поверхні листя, обмеження транспірації рослин через товсту кутикулу рослини або зменшення кількості продихів, а також розвиток глибоких коренів (Wittig 2008). Фізіологічні коригування включають ефективний контроль транспірації або скориговану орієнтацію листя, щоб уникнути прямого сонячного випромінювання (Roloff 2013a). Крім того, важлива здатність відновлюватися після періоду стресу (Gallé & Feller 2007). Фізіологічні реакції лісових дерев на посуху розглядаються та обговорюються більш детально в Rennenberg et al. (2006).

2.4. Клімат і зміна клімату в Німеччині

Клімат Німеччини можна описати як «теплий помірно-вологий клімат середніх широт» (DWD 2015a). Країна розташована в перехідній зоні між океанічним кліматом Західної Європи та континентальним кліматом Східної Європи. На Німеччину в основному впливають західні вітри, які несуть вологу з Атлантичного океану вглиб країни, викликаючи океанічні умови з м'яким літом і зимою. Цей вплив високий у північно-західних частинах країни і низький у південно-східних частинах, де умови змінюються в сторону більш континентального клімату. Іноді системи високого тиску блокують цю типову схему вітру, що призводить до спекотного та сухого літа та холодної зими. Крім макрокліматичних умов, рельєф змінює регіональні кліматичні характеристики, напр. викликаючи орографічні опади (DWD 2015a).

Найтеплішими регіонами протягом літньої половини року є рифтова долина Верхнього Рейну, регіон Нижнього Рейну та невеликі частини Східної Німеччини (DWD 2015a). У цих регіонах, особливо в долині Верхнього Рейну, також спостерігається найбільша кількість спекотних днів (макс. добова температура повітря $\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) на рік. Найменша кількість опадів протягом літньої половини року спостерігається у Східній Німеччині, особливо в Саксонії-Ангальт і Бранденбурзі. Відповідно, у цих регіонах

також спостерігається найбільша кількість сухих днів (добова сума опадів < 1 мм) на рік. Більш детальний опис клімату в Німеччині та процесів впливу можна знайти, напр. у Liedtke & Marcinek (2002).

Дні, коли добова максимальна температура досягає або перевищує $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, тут визначаються як спекотні дні. Теплові хвилі зазвичай описують як періоди, що тривають кілька послідовних днів з високими температурами. Однак єдиного визначення не існує, а порогові значення, які визначають хвилю тепла (кількість послідовних днів і необхідна температура), відрізняються в різних країнах (Bender & Schaller 2014). Дотримуючись визначення, використаного Jacob et al. (2014: 566), надалі хвиля спеки визначається як «період[] більше трьох днів поспіль, що перевищує 99-й перцентиль добової максимальної температури сезону з травня по вересень контрольного періоду (1971–2000)». Відповідно, принаймні чотири дні поспіль повинні перевищувати цей відносний поріг, щоб подія вважалася хвилею тепла.

Клімат у Німеччині регіонально різноманітний, і прогнозовані кліматичні зміни демонструють певну просторову мінливість. Тому робити узагальнені заяви щодо очікуваних змін для всієї країни не дуже розумно у випадку регіональних та місцевих заходів адаптації. Для цього регіональні кліматичні моделі можуть дати більш детальну картину прогнозованих тенденцій для конкретних регіонів. Різні джерела пропонують інформацію про прогнозовані регіональні кліматичні зміни на основі різних ансамблів і сценаріїв: Різні карти та часові рамки прогнозованих змін на основі ансамблю до 21 регіональної моделі клімату надаються в Інтернеті Deutscher Wetterdienst (DWD 2015b) (наразі доступні для сценаріїв викидів A1B). Крім того, нещодавно опублікована доповідь про вразливість Німеччини до зміни клімату (Umweltbundesamt 2015) також представляє прогнозовані зміни на основі ансамблю з 17 регіональних кліматичних моделей із використанням сценарію викидів A1B. Джейкоб та ін. (2014). Якоб та ін. (2014) крім того, порівнюють результати з попередньо отриманими прогнозами проекту

ENSEMBLES, який використовує сценарій викидів A1B.

Наступні параграфи дають лише дуже короткий огляд прогнозованих змін для всієї країни, оскільки цей загальнонаціональний погляд не є основним предметом цієї роботи. Для отримання більш детальної інформації, будь ласка, зверніться до цитованих джерел. Що стосується температури, Umweltbundesamt (2015) передбачає підвищення середньої температури повітря для 2021-2050 і 2071-2100 років. Очікується, що збільшення буде сезонним і регіональним. Прогнозується, що підвищення середніх температур, як правило, буде більш вираженим взимку (DJF), ніж влітку (JJA). Крім того, прогнозоване підвищення температури є сильніше на півдні, ніж на півночі як для річних, так і для сезонних змін. Збільшення середньорічної температури також повідомляє Jacob et al. (2014), які прогнозують значне та стійке підвищення середньорічної температури в Німеччині на 2071-2100 роки. У південній та північно-східній частині Німеччини прогнозується дещо сильніше зростання порівняно з рештою країни. Прогнозовані підвищення будуть сильніше за RCP8.5: від 2,5 до 3,5°C у північній Німеччині та від 3,5 до 4°C у південній Німеччині. Усі зміни значущі та надійні. Ці прогнози показують подібні тенденції, як і порівняний сценарій A1B, який вказує на підвищення середньорічної температури на 2-2,5°C.

Прогнозується, що спекотні дні (максимальна добова температура повітря $\geq 30^{\circ}\text{C}$) стануть частішими в 2020-2050 рр. і до кінця століття (2071-2100 рр.), з більшим зростанням у південній Німеччині, ніж у північній Німеччині (Umweltbundesamt 2015).). Поряд з цим, прогнозується, що тропічні ночі (добова мінімальна температура повітря $\geq 20^{\circ}\text{C}$) загалом почастишають до кінця століття з регіональними відмінностями по всьому округу (Umweltbundesamt 2015). За даними Jacob et al. (2014), середня кількість хвиль тепла (визначена як понад три дні, що перевищують 99-й процентиль добової максимальної температури сезону травня-вересня для контрольного періоду 1971-2000 рр.), за прогнозами, зросте до 2071-2100 рр.

(зміни є значущими та надійними). Знову ж таки, прогнозовані зміни сильніші на півдні, ніж на півночі Німеччини (Jacob et al. 2014). Крім того, аналіз Christidis et al. (2014) відповідає прогнозованим збільшенням спекотних днів і припускає, що надзвичайно спекотне літо, подібне до літа 2003 року, буде дуже поширеним до 2040-х років. Однак зміни можуть відрізнятися регіонально та сезонно.

Прогнозовані зміни кількості опадів неоднорідні в просторі та часі. Ансамбль, який використовується Umweltbundesamt (2015), включає деякі зростаючі, а також деякі зменшувальні прогнози для літньої суми опадів (JJA) у 2020-2050 роках. Для 2071-2100 рр. діапазон ансамблю включає збільшення прогнозів лише для кількох регіонів на північному сході, тоді як загалом ансамбль більше вказує на зменшення середньої суми літніх опадів. Для суми зимових опадів (DJF) прогнозується збільшення для обох періодів часу, за винятком лише кількох невеликих областей. На відміну від температури, зміни опадів більш неоднорідні в просторі і мають менший масштаб (Umweltbundesamt 2015). Якоб та ін. (2014) проект збільшує річну кількість опадів для RCP4.5 і RCP8.5, за винятком деяких районів на північному заході, де в RCP4.5 не вказано великих змін. Прогнозовані зміни є значними та надійними для більшості районів Німеччини (Jacob et al. 2014).

За прогнозами, засушливі періоди (визначені Umweltbundesamt 2015 як ≥ 10 послідовних сухих днів, зверніть увагу, що в цій дисертації використовується ≥ 5 послідовних сухих днів як поріг) прогнозується, що влітку 2071-2100 років відповідно до Umweltbundesamt (Umweltbundesamt). Поряд із цими змінами, в деяких регіонах очікується збільшення кількості сильних дощів (≥ 20 мм опадів), а в деяких регіонах, за прогнозами, майже не буде змін. Ці зміни знову дуже просторово неоднорідні в невеликих масштабах (Umweltbundesamt 2015). Проекції, показані Jacob et al. (2014) вказують на збільшення сезонних сильних опадів протягом року. Проте, особливо за RCP4.5, зміни не є суттєвими в кількох регіонах. Що стосується тривалості засушливих періодів, ансамбль не прогнозує більших

змін, проте зміни не є значними в деяких регіонах, а в деяких випадках також не є надійними (Jacob et al. 2014).

Очікується, що зміна клімату вплине на ріст і придатність кількох видів дерев. Підвищення температури повітря збільшує попит на випаровування і може погіршити доступність води в ґрунті та критично вплинути на певні породи дерев, які недостатньо пристосовані до стресу від посухи (Scherer et al. 2011, Köcher et al. 2009, Burk 2006). Вже спостерігається тенденція до більш екстремальних кліматичних умов, таких як інтенсивні та тривалі літні посухи (Bauer 2012). Сала та ін. (2010) пов'язують глобальне загибель дерев за останні роки зі зміною клімату, особливо з наслідком посухи. Вважається, що більш високі рівні стресу знижують життєздатність дерев, у важких випадках навіть призводять до загибелі та знижують стійкість до шкідників та хвороб під час майбутніх змін клімату (Bauer 2012, Volte et al. 2012). Тим не менш, залишається невизначеність щодо точного впливу зміни клімату на породи дерев (Allen et al. 2010). Знань про вплив літніх посух на кореневі системи все ще відносно небагато, і потрібна додаткова інформація про чинники смертності дерев і специфічний вплив кліматичних факторів на дерева (Allen et al. 2010, Burk 2006).

3. КЛІМАТИЧНІ ПРОГНОЗИ ДЛЯ РЕГІОНІВ ТЕМАТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Проектування регіональних кліматичних змін за допомогою ансамблю EURO-CORDEX

Часто глобальні кліматичні моделі не пропонують достатньо точні просторові дозволи для регіонального аналізу зміни клімату. Натомість регіональні кліматичні моделі пропонують інформацію з більш високою просторовою роздільною здатністю (Umweltbundesamt 2015). Регіональні сценарії зміни клімату з високою роздільною здатністю особливо важливі для розробки стратегій адаптації до зміни клімату (Jacob et al. 2014). Ця дипломна робота базується на прогнозах регіональної зміни клімату з високою роздільною здатністю (0,11° / 12,5 км) від ініціативи Європейського

координованого регіонального експерименту зі зменшення масштабів (EURO-CORDEX). Ансамбль EURO-CORDEX моделює майбутній клімат за допомогою репрезентативних шляхів концентрації (RCP). Ці RCP були розроблені експертами з моделювання та використовуються у П'ятому звіті про оцінку IPCC (AR5) (Jacob et al. 2014, Cubasch et al. 2013, van Vuuren et al. 2011).

Існують чотири різні сценарії RCP: RCP2.6 (низький), RCP4.5 (середньо-низький), RCP6 (середньо високий) і RCP8.5 (високий) (van Vuuren et al. 2011). Кожен із цих сценаріїв супроводжується різним очікуваним радіаційним впливом, напр. RCP4.5 передбачає зростання на 4,5 Вт/м² до кінця 21 століття порівняно з доіндустріальною ситуацією. Для порівняння, сценарій A1B, який є найбільш часто використовуваним сценарієм SRES, напр. в рамках проекту ENSEMBLES приблизно відповідає RCP6 щодо радіаційного впливу (Jacob et al. 2014). Часовий розвиток радіаційного впливу для різних RCP показано на рис. 2. Для детального обговорення репрезентативних шляхів концентрації див. van Vuuren et al. (2011). Кліматичні дані, використані в цьому дослідженні, включають ансамбль з 21 моделювання EURO-CORDEX, 10 з використанням середньо-низького сценарію RCP4.5 і 11 з використанням найвищого сценарію RCP8.5. Зверніть увагу, що в розділі 3.3, де представлені результати моделювання, вони розрізняються між двома RCP лише у випадку, якщо є чіткі відмінності між прогнозованими медіанами або діапазонами сценаріїв. Передбачається, що всі окремі моделювання мають однакову ймовірність появи.

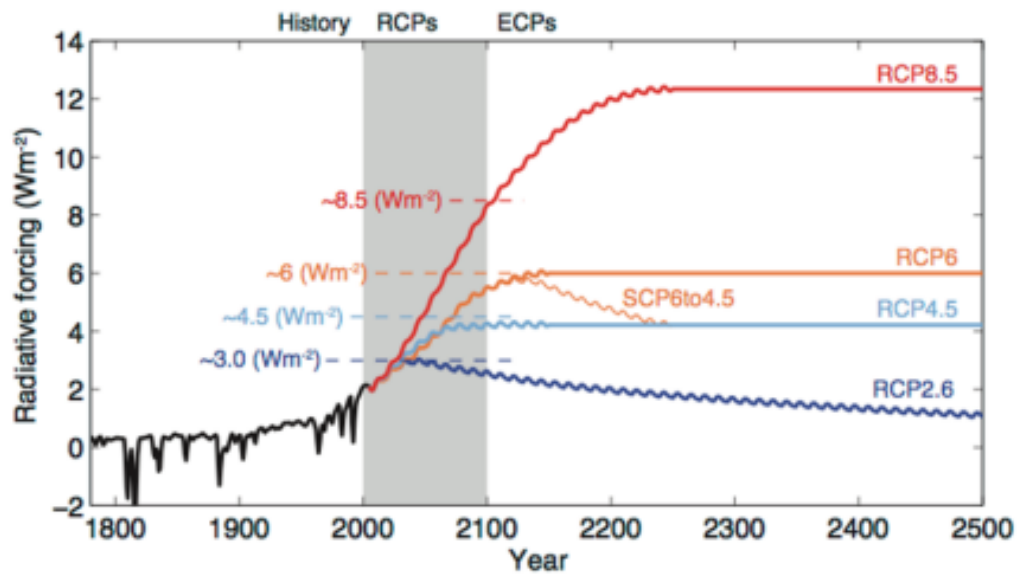


Рис. 2 Загальний радіаційний вплив (антропогенний плюс природний) для різних РКП. Відображаються RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5 і розширені шляхи концентрації (ECP). У цій дипломній роботі використовуються RCP4.5 (світло-синій) і RCP8.5 (червоний). Для будь-якого сценарію існує невизначеність як поточних, так і майбутніх рівнів РФ. Джерело: Cubasch et al. (2013).

Слід зазначити, що в моделюванні клімату існують різні джерела невизначеності. Перш за все, моделі спрощують природні процеси, використовуючи різні методи спрощення, специфічні для моделі.

Крім того, існує невизначеність щодо майбутнього розвитку антропогенних викидів парникових газів. Більше того, багато процесів у кліматичній системі є нелінійними і, таким чином, включають природну недетерміновану мінливість (Pfeifer et al. 2015). Перевагою використання мультимодельного ансамблю в порівнянні з одиночними моделями є загальне підвищення валідності результатів з урахуванням зазначених різних джерел невизначеності. Використовуючи ансамблевий підхід, розглядається не тільки один можливий розвиток, спроектований однією моделлю, а один конкретний сценарій. Натомість враховується ряд змін, прогнозованих різними моделями та різними сценаріями (Pfeifer et al. 2015, Umweltbundesamt 2015, Climate Service Center 2.0 2014). Проте слід зазначити, що результати ансамблю є прогнозованими можливими змінами – ні прогнозами, ні прогнозами. Вони містять певну пропускну здатність можливих змін. Для кліматичних прогнозів можна припустити різні граничні умови, які впливатимуть на

кінцеві результати. На відміну від цього, прогнози погоди також містять певну пропускну здатність, але значною мірою залежать від відомих початкових умов.

Рішення про посадку, які приймаються сьогодні, впливають на видовий склад протягом кількох десятиліть через довгу тривалість життя багатьох порід дерев. Незважаючи на це, часові рамки, найбільш релевантні для міських планувальників, зосереджені на більш короткому проміжку часу, який охоплює переважно наступні кілька десятиліть, а не враховує період до кінця століття (SBI 2014, Leuschner 2009). Відповідно було обрано період часу, який досліджувався в ході цієї дипломної роботи.

Тому основна увага зосереджена на періоді 2036-2065 років, надалі званому 2050-ми або найближчим майбутнім. Довідковим періодом є 30-річний період з 1971 по 2000 роки. Більш віддалене майбутнє тут визначається як період 2071-2100 років. Обидва майбутні періоди відображаються в розділі результатів, щоб забезпечити хоротаблшу візуалізацію можливих тенденцій, оскільки деякі з них можуть стати очевидними лише в більш віддаленому майбутньому. Проте, відповідно до обраного фокусу, більш пізній період часу далі не обговорюється.

3.1.2. Підведення підсумків проекту

Як видно з даних E-OBS, наразі Схід є найпосушливішим із трьох регіонів, оскільки сума опадів протягом вегетаційного періоду нижча, а максимальна тривалість посушливих періодів довша, ніж в інших регіонах. Крім того, на Сході спостерігається одна з найбільших посушливих періодів. За кількістю спекотних днів Схід коливається між двома іншими регіонами. Проект передбачає збільшення суми опадів. Однак сигнали про зміну кількості та тривалості посушливих періодів не є чіткими. Прогнозоване збільшення суми опадів за певних обставин може призвести до збільшення доступності води, якщо опади будуть рівномірно розподілені в часі. Проте збільшення суми опадів також може бути викликано збільшенням сильних

дощів, у той час як засушливі періоди стають тривалішими та більш серйозними. З іншого боку, такий розподіл призведе до зниження доступності води. Таким чином, сама прогнозована сума опадів не дозволяє прогнозувати будь-які зміни доступності води. Подальші індекси, напр. фіксація одночасного виникнення спеки та посухи може дати додаткову інформацію про наявність води.

Крім того, прогнозується збільшення кількості спекотних днів і хвиль спеки. Виходячи з прогнозу, ця зміна може призвести до збільшення умов теплового стресу. Крім того, високі температури можуть викликати або посилити умови посухи через збільшення дефіциту тиску пари повітря і, як наслідок, збільшення випаровування. Тим не менш, залишається невизначеність щодо величини прогнозованих змін у спекотні дні та хвилі спеки. Крім того, без достовірної інформації про тривалість хвиль тепла єдине збільшення кількості не дозволяє стверджувати про реальний вплив. Як приклад, збільшення кількості та частоти теплової хвилі може бути збалансовано одночасним замиканням кожної відповідної хвилі тепла. У цьому випадку вплив буде менш сильним, ніж у випадку одночасного поширення хвиль тепла.

Північно-західний регіон з його морським кліматом лише помірно сухий і теплий порівняно з двома іншими регіонами. В даний час він отримує найбільшу кількість опадів протягом вегетаційного періоду і має найменшу кількість посушливих періодів, які також мають меншу максимальну тривалість, ніж у Східному регіоні. Крім того, на північному заході спостерігається менше спекотних днів, ніж в інших регіонах. У 2050-х роках ансамбль прогнозує збільшення кількості спекотних днів і хвиль спеки. Крім того, не можна дати чітку проекцію для тривалості хвиль спеки, що спричиняє невизначеність у тому, чи буде регіон зіткнутися з більшими, коротшими хвилями спеки в майбутньому або більш тривалими хвилями тепла. Для інших індексів (сума опадів, кількість та максимальна тривалість

посушливих періодів) чіткого напрямку зміни не прогнозовано.

Наразі південно-західний регіон є найтеплішим регіоном через його розташування в долині Верхнього Рейну. Відповідно, найбільша кількість спекотних днів. У той же час кількість опадів менше, ніж на північному заході, але вище, ніж на східному. За прогнозами, у 2050-х роках у південно-західному регіоні спостерігатиметься більша кількість і довша максимальна тривалість посушливих періодів. Крім того, прогнозується збільшення кількості спекотних днів, а також кількості хвиль спеки. Щодо середньої тривалості хвиль спеки та суми опадів не можна зробити певного твердження. Тому неясно, чи будуть в регіоні хвилі спеки частіші та триваліші, чи хвилі тепла відбуватимуться частіше, але кожна з них коротша порівняно з поточною ситуацією. Згідно з результатами ансамблю, прогнозується, що умови на ПЗ у 2050-х роках будуть більш сухими з більшою кількістю спекотних днів, ніж сьогодні. Як наслідок, і без того найтепліший регіон може відчувати все більш напружені спеки в поєднанні з тривалішими та частішими посухами. Проте, щодо величини змін все ще існує діапазон можливих змін. Зведення прогнозованих змін для всіх показників та регіонів із тематичними дослідженнями на 2050-ті роки наведено в табл. 5. Відповідні напрямки змін наводяться лише в тих випадках, коли ансамбль показує чіткий сигнал в одному напрямку.

табл. 4 Прогнозовані зміни шести кліматичних індексів на 2036-2065 рр. у порівнянні з

Climate indices	Measure	East			Northwest			Southwest		
		Ensemble	RCP4.5	RCP8.5	Ensemble	RCP4.5	RCP8.5	Ensemble	RCP4.5	RCP8.5
Precipitation sum (%)	<i>Median</i>	4.0	4.0	6.5	-1.3	-2.3	-1.3	-0.7	0.0	-0.7
	<i>Min</i>	-6.8	-6.8	0.0	-13.0	-13.0	-4.2	-17.1	-17.1	-6.6
	<i>Max</i>	20.3	9.2	20.3	10.9	10.1	10.9	10.7	5.85	10.7
	<i>Likely range</i>	0.5 to 9.2			-4.2 to 8.3			-6.6 to 4.0		
Number of dry spells (no.)	<i>Median</i>	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.1	0.5
	<i>Min</i>	-0.7	-0.6	-0.7	-1.0	-1.0	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3
	<i>Max</i>	0.9	0.9	0.6	1.1	0.7	0.9	1.2	1.2	1.2
	<i>Likely range</i>	-0.4 to 0.5			-0.2 to 0.7			-0.2 to 0.9		
Duration of dry spells (%)	<i>Median</i>	0.6	-3.0	0.6	1.3	-1.2	2.1	7.3	9.9	6.6
	<i>Min</i>	-10.5	-10.3	-10.5	-11.3	-9.9	-11.3	-3.2	-2.7	-3.2
	<i>Max</i>	18.3	11.3	13.1	22.4	22.4	15.1	19.5	15.4	19.5
	<i>Likely range</i>	-7.8 to 10.5			-5.0 to 16.6			0.0 to 14.6		
Number of hot days (days)	<i>Median</i>	3.3	3.2	3.3	1.6	1.8	1.3	5.0	5.3	4.3
	<i>Min</i>	0.6	0.6	0.7	-0.1	0.2	-0.1	0.9	0.9	2.0
	<i>Max</i>	11.1	11.1	9.0	5.0	5.0	4.5	14.7	13.0	14.7
	<i>Likely range</i>	1.3 to 5.1			0.5 to 3.2			2.6 to 10.0		
Number of heat waves (no.)	<i>Median</i>	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3
	<i>Min</i>	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
	<i>Max</i>	0.6	0.6	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.6	0.5
	<i>Likely range</i>	0.0 to 0.3			0.0 to 0.3			0.1 to 0.4		
Duration of heat waves (days)	<i>Median</i>	-0.2	-0.5	0.2	-0.3	-0.3	-0.5	0.4	0.1	0.9
	<i>Min</i>	-3.8	-2.8	-3.8	-2.7	-2.7	-2.3	-1.9	-1.8	-1.9
	<i>Max</i>	1.8	1.8	1.2	1.4	1.4	1.3	1.7	0.8	1.7
	<i>Likely range</i>	-2.1 to 0.8			-1.2 to 0.7			-0.4 to 1.1		

1971-2000 рр. для трьох регіонів.

табл. 5 Підсумок прогнозованих змін для всіх показників та регіонів із тематичними дослідженнями на 2050-ті роки. Усі індекси відносяться до вегетаційного періоду травня – вересня. Для порівняння наведено медіанні значення ансамблю.

Climate indices	East	Northwest	Southwest
<i>Precipitation sum</i>	increase (+4.03 %)	–	–
<i>Number of dry spells</i>	–	–	increase (+0.42 dry spells)
<i>Maximum duration of dry spells</i>	–	–	increase (+7.34 %)
<i>Number of hot days</i>	increase (+3.31 days)	increase (+1.63 days)	increase (+5.01 days)
<i>Number of heat waves</i>	increase (+0.14 heat wave)	increase (+0.11 heat wave)	increase (+0.25 heat wave)
<i>Average duration of heat waves</i>	–	–	–

3.2. Обговорення прогнозованих кліматичних змін

3.2.1. Аналіз та інтерпретація проєкцій ансамблю EURO-CORDEX

Під час аналізу майбутніх змін, які прогнозує ансамбль EURO-CORDEX, стало очевидним, що для окремих індексів в одному чи кількох регіонах немає чіткої тенденції. Єдиними двома індексами, за якими ансамбль проєктує видиму тенденцію для всіх регіонів, є кількість спекотних днів і спеки – обидва індекси на основі температури. Загалом, опади складніше моделювати, ніж температуру, оскільки вони залежать від більшої різноманітності факторів і мають більшу просторову та тимчасову мінливість (EPA 2014). Широта, висота, переважаючі вітрові та океанічні течії, сонячна радіація в основному визначають температуру. Опади, з іншого боку, визначаються великомасштабними моделями циркуляції та конвективними процесами, а також місцевою топографією та менш масштабними процесами, такими як випаровування. Загалом, опади можна класифікувати на конвективні, орографічні та циклонічні (Barry & Chorley 2009). Складність правильного моделювання опадів додатково посилюється тим фактом, що дрібномасштабні коливання для опадів більші, ніж для температури (EPA 2014). Щодо прогнозів EURO-CORDEX загалом, Kotlarski et al. (2014) звіт

про усереднені сезонні та регіональні упередження. У той час як відхилення температури в основному менші за 1,5 °C, зміщення опадів у середньому набагато більше і може становити до $\pm 40\%$.

Результат можна визначити як надійний, якщо він «підтримується різноманітними підходами, методами, моделями та припущеннями та такий, на який, як очікується, не вплине невизначеність» (Hennemuth et al. 2013: 119). Якоб та ін. (2014) перевірили надійність результатів моделювання EURO-CORDEX за допомогою двох статистичних тестів, перший – щодо згоди щодо напрямку змін, а другий – щодо значимості змін на основі критерію Манна-Уїтні-Вілкоксона. Усі прогнозовані зміни річних та сезонних середніх температур у Європі були надійними в їхньому дослідженні (Jacob et al. 2014). З іншого боку, прогнозовані зміни загальної річної чи сезонної кількості опадів були значними та стійкими лише в деяких районах. Для Німеччини результати є особливо незрозумілими для літніх та осінніх опадів, коли зміни не є значними або стійкими для великих територій країни. Оскільки ця теза працює з подібним ансамблем, як Jacob et al. (2014), прогнози не були повторно перевірені статистично на значущість та надійність.

За даними Jacob et al. (2014), загальна річна кількість опадів загалом, за прогнозами, збільшиться в Північній Європі і зменшиться в Південній Європі. Посередині є зона з меншими та незначними змінами, що включає переважно частини Франції, Італії, Балканського півострова та Чорноморського регіону. Виявилося, що сезонні зміни кількості опадів більш неоднорідні за регіонами. Зона з невеликими і незначними змінами влітку зміщується на північ, а взимку на південь. Отже, Німеччина влітку та восени входить до перехідної зони. Таким чином, хоча прогнозоване збільшення зимових та весняних опадів є переважно значним і стійким, зміни менш чіткі для літа та осені. Протягом цих двох сезонів для значної частини Німеччини

не прогнозується значних і серйозних змін (Jacob et al. 2014).

Тривалість теплових хвиль є індексом на основі температури. Тим не менш, це не дає чіткої тенденції в цьому дослідженні через те, що статистичні значення усереднені за 30-річний період. У порівнянні з посушливими періодами, які трапляються кілька разів протягом кожного вегетаційного періоду, хвилі спеки є досить рідкісними подіями. Вони трапляються не щороку, тому за статистикою буває менше однієї хвилі спеки на рік. Середні значення, відображені в часовому ряді, розраховувалися для кожного 30-річного періоду протягом усього періоду часу. Таким чином, при переході до наступного періоду часу, що розглядається, один рік додавався в кінці 30-річного періоду, а один рік віднімали на початку. У результаті може бути включена додаткова хвиля тепла порівняно з попередньо розрахованим 30-річним періодом або, з іншого боку, теплова хвиля виключена з нового періоду. У зв'язку з тим, що хвилі тепла в даний час є досить рідкісними подіями, рік з однією або навіть кількома хвилями тепла може сильно вплинути на середнє значення за 30 років і, таким чином, викликати різкі зміни та швидке збільшення або зменшення часового ряду (порівняйте рис. A16 і Рис. A17).

Як показали результати, багато членів ансамблю схильні переоцінювати або занижувати абсолютні значення порівняно з даними E-OBS. Однак це не означає, що прогноз змін на майбутнє нереалістичний. Одна модель може припускати дуже сухі загальні умови порівняно з іншою моделями, але вони все одно можуть узгоджувати напрямок і розміри змін. Важливо порівняти змодельовані дані з даними спостережень, щоб оцінити, чи відображає модель реалістичний діапазон значень. Як правило, абсолютні значення не слід тлумачити надмірно. Чим більше членів ансамблю у кожному сценарії погоджуються щодо напрямку, а також величини змін, тим надійнішою стає прогнозована тенденція. Зверніть увагу, що багато карт, наведених у Додатку

В, відображають абсолютні значення. Хоча до них слід ставитися з обережністю, карти все ще можна використовувати для порівняння регіональних відмінностей і просторових моделей прогнозованих змін індексів.

Симуляції RCP4.5 і RCP8.5 часто прогнозують подібні діапазони та середні значення для 2050-х років, в той час як іноді виникають відмінності між двома RCP в більш пізній період (2071-2100) (див., наприклад, рис. 5, рис. A7 і рис. A12). Причина цього пов'язана з інертністю, тобто уповільненою реакцією кліматичної системи на антропогенні впливи. Хоча в найближчому майбутньому все ще переважають десятирічні зміни, вплив збільшення викидів парникових газів в основному стає очевидним пізніше, у більш віддаленому майбутньому. Це пояснює, чому шляхи RCP4.5 і RCP8.5 у багатьох випадках показують подібні результати для 2050-х років, але показують все більш різні результати наприкінці століття.

Проекції EURO-CORDEX можуть відображатися в різних форматах. У цій дипломній роботі для представлення результатів моделювання використовуються два види часових рядів (результати ансамблю або окремі моделювання), а також карти. Як зазначено вище, часові ряди та карти є двома формами візуалізації даних з різними цілями: відображення тимчасового розвитку індексу для одного регіону або просторової моделі індексу. Тимчасові ряди мають загальну перевагу в тому, що різні статистичні показники (тобто мінімальні, максимальні, середні значення, ймовірний діапазон) можуть бути узагальнені та візуалізовані на одній фігурі. Наприклад, стає очевидним, якщо більшість учасників ансамблю погоджуються щодо сили та напрямку змін (вузький ймовірний діапазон), або якщо вони сильно розходяться (широкий ймовірний діапазон).

Крім того, видно весь діапазон проекцій, що дає інформацію за межами

середнього або медіани ансамблю. Особливо у випадках, коли ансамбль не дає чіткого сигналу щодо прогнозованого напрямку чи величини змін, врахування лише медіани ансамблю може ввести в оману. Ще однією перевагою часових рядів є видимий розвиток прогнозів у часі. У той час як карта відображає лише одне значення на клітинку сітки, лише часовий ряд може відобразити прогнозований тимчасовий розвиток індексу. Таким чином, він дозволяє оцінити середні значення або діапазони порівняно з попередніми чи пізніми періодами часу. З іншого боку, карти, показані тут, показують лише середні ($\neq$ медіана!) значення ансамблю без урахування ансамблю чи ймовірних діапазонів. Таким чином, ці карти не дають жодної інформації про інші статистичні значення. Засновувати інтерпретації виключно на таких одиничних значеннях є критичним, особливо якщо результати учасників ансамблю значно відрізняються.

Тим не менш, карти корисні для аналізу просторових моделей та порівняння конкретного регіону з його околицями чи іншими частинами країни. Оскільки часові ряди дають інформацію лише про територію, що розглядається, не очевидно, чи очікується, що оточення зазнає подібних змін, чи регіон із прикладом є винятком, напр. через локальні відмінності в топографії. Крім того, просторові закономірності легше виявити на карті, ніж порівнюючи різні часові ряди. Цілком зрозуміло, що обидва формати відображення надають різну інформацію, і обидва мають свої переваги та обмеження. Тому комбінація обох форматів дає більш повну інформацію про проекції ансамблю.

3.2.2. Наслідки для відбору міських порід дерев

Для деяких індексів не вдалося вивести суттєвих змін із моделювання ансамблю. Це пояснюється невизначеністю моделі, а також природною мінливістю клімату. Крім того, знадобляться додаткові індекси для подальшого дослідження змін у фактичній доступності води. Шість обраних індексів – навіть за умови, що результати були менш неоднозначними –

спеціально не враховують одночасне виникнення хвиль тепла та засухи. Крім того, додаткові індекси, більш орієнтовані на фактичну доступність води (наприклад, кількість опадів щодо випаровування, вологість ґрунту тощо), можуть дати додаткове уявлення. Точні наслідки для майбутніх кліматичних умов, з якими доведеться впоратися міським деревам, залишаються до певної міри неясними. Недостатня узгодженість ансамблю за декількома показниками дозволяє робити висновки лише в обмеженій мірі і сама по собі недостатня для давання чітких рекомендацій за чи проти певної породи дерев. Але це не означає, що ансамбль EURO-CORDEX надає недостатню інформацію. Ансамблеві проєкції завжди забезпечують пропускну здатність можливих змін. Опади все ще важко прогнозувати, особливо в перехідних зонах, наприклад, у Центральній Європі. Як повідомляє Jacob et al. (2014) показують, більш чіткі прогнози з більшою згодою учасників ансамблю можливі для інших регіонів та загалом для інших індексів. Таким чином, частково слабка згода учасників ансамблю в цій дипломній роботі не буде контраргументом проти використання регіональних кліматичних моделей, таких як ансамбль EURO-CORDEX.

Ансамбль EURO CORDEX проєктує більшу кількість спекотних днів і частіші хвилі спеки. Ці умови вже самі по собі можуть підвищити ризик стресу від посухи у рослин через зниження доступності води внаслідок збільшення випаровування. Крім того, транспірація рослин збільшується з підвищенням температури. Незважаючи на те, що представлені тут результати не можуть дати чітких ознак для інших індексів, інші дослідження погоджуються щодо деяких очікуваних майбутніх змін у Німеччині. У багатьох інших дослідженнях (наприклад, DWD 2015a, Christidis et al. 2014, Kovats et al. 2014, Jacob et al. 2014, EEA 2012b, European Commission 2009, Schuchardt et al. 2008) очікується підвищення середніх температур у Європі з найбільше підвищення температури в Північній Європі взимку і в Південній Європі влітку. Не менш важливо, що влітку прогнозується збільшення

екстремальних подій, таких як посухи та хвилі спеки. Для всієї Європи МГЕЗК AR5 (див. Kovats et al. 2014) підсумовує прогнозовані зміни на основі різних досліджень. У той час як для температури існує висока узгодженість моделей клімату із загальною тенденцією потепління в Європі, прогнози опадів мають більші коливання, як сезонні, так і регіональні. Незважаючи на те, що невизначеність залишається, загальний консенсус у сучасній літературі полягає в тому, що рослинності доведеться впоратися з більш теплими та сухими літніми умовами в Німеччині в майбутньому. Незважаючи на те, що індекси на основі опадів залишаються невизначеними, умови сухого ґрунту також можуть бути наслідком підвищення температури та збільшення випаровування (Kovats et al. 2014). Виходячи з цього припущення, в майбутньому буде необхідною адаптація до більш теплих і сухих літніх умов. У будь-якому випадку слід звернути увагу на методи, які використовуються в різних дослідженнях. Незважаючи на те, що використання ансамблевого моделювання є найсучаснішим, деякі дослідження розглядають лише окремі моделі. Крім того, не всі вони мають високу просторову та тимчасову роздільну здатність, яку пропонує набір даних EURO-CORDEX. Незважаючи на те, що висока роздільна здатність не є гарантією надійних результатів, вона все одно пропонує нові результати, які раніше були неможливими з більш грубими роздільними можливостями.

Щоб бути в безпечному місці, містобудівники повинні враховувати загальну можливість помітно теплішого, а також більш сухого літа при виборі порід дерев для міських районів – незважаючи на невизначеність, що залишилася. Що стосується опадів, то також у майбутньому очікується велика міжрічна мінливість, яка навіть може бути виражена. Таким чином, необхідна адаптація як до зниження, так і до збільшення доступності води. Ця теза зосереджується саме на можливому посиленні умов спеки та посухи, оскільки вже сьогодні дерева часто страждають від спеки та стресу від посухи в містах через суворі умови в міських районах. Тому передбачається, що збільшення доступної води може навіть бути корисним для дерев у цьому

контексті, тоді як зменшення, як правило, матиме негативний вплив. Адаптація до зміни клімату часто здійснюється з метою використання без жалю та безпрограшних заходів. Це означає, що заходи адаптації в ідеалі забезпечують більше ніж одну перевагу. Застосовані заходи не повинні мати жодних негативних наслідків (без жалю) і все одно повинні бути корисними в інший спосіб (безпрограшний), навіть якщо в кінцевому підсумку кліматичні зміни затримуються або будуть менш серйозними, ніж очікувалося (Gill et al. 2013, EEA 2012b, BMVBS 2011). У випадку міських дерев вибір видів, стійких до спеки та посухи, може вважатися таким заходом без жалю: зрештою, у гіршому випадку вибрані види краще пристосовані до стресових умов, ніж альтернативні. Проте, якщо умови виявляються менш стресовими, ніж очікувалося, вид все ще може добре рости та забезпечувати свої переваги, як обговорено в розділі 2.2.1.

4. ПОСУХОСТІЙКІСТЬ І ЖАРОСТІЙКІСТЬ ОКРЕМИХ ПОРІД ДЕРЕВ

4.1. Огляд порід дерев

Десять видів широколистяних дерев проаналізовано на предмет кліматологічних вимог, зосереджено на їх толерантності до посухи та теплового стресу, щоб оцінити майбутню придатність до впливу зміни клімату. Відбір видів (див. табл. 6) базувався на огляді рослинності міського парку Фрізойт, Нижня Саксонія. Всі види зазвичай використовуються як паркова рослинність по всій Німеччині. Сухі умови і високі температури часто впливають на дерево одночасно. Вищі температури збільшують випаровування і, таким чином, прискорюють висихання ґрунту та зменшують доступність води (Roloff & Grundmann 2008a). Більше того, стрес від посухи може бути викликаний не тільки безпосередньо відсутністю опадів і доступної води, а й опосередковано через високі температури і, як наслідок, посилене випаровування. Тому наслідки посухи та спеки не розглядаються окремо, а обговорюються разом. Як зазначалося раніше, посуха не є синонімом посухи, оскільки не кожна посуха обов'язково викликає умови посухи. Вологість ґрунту може бути достатньо високою, щоб забезпечити рослини достатньою кількістю води в період відсутності опадів. З іншого боку, у випадках дуже низької вологості ґрунту короткий період сухості вже може викликати стрес від посухи у дерев. Аналогічно, теплова хвиля може спричинити тепловий стрес у дерев, але місцеві умови, такі як доступність вологи для охолодження через транспірацію рослин, впливають на те, наскільки сильно зазнає рослина. Таким чином, не кожна хвиля тепла викликає однакові ознаки теплового стресу у дерев. Проте засухи, особливо в поєднанні з хвилями тепла, за певних обставин можуть викликати посуху (Bender & Schaller 2014). Використовуючи термін посуха в цій дипломній роботі, передбачається, що стрес від посухи може виникнути як наслідок сухості разом з іншими факторами.

табл. 6 *Список з десяти вибраних широколистяних порід дерев.*

	Botanical name	English name(s)
1	<i>Acer platanooides</i>	Norway Maple
2	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Sycamore, Sycamore Maple,
3	<i>Aesculus hippocastanum</i>	Horse-Chestnut, Common Horse-Chestnut
4	<i>Alnus glutinosa</i>	Alder, Common Alder, Black Alder
5	<i>Betula pendula</i>	Silver Birch, European Birch
6	<i>Fagus sylvatica</i>	European Beech, Common Beech
7	<i>Fraxinus excelsior</i>	Ash, European Ash, Common Ash
8	<i>Populus nigra</i>	Black Poplar
9	<i>Quercus robur</i>	English Oak, Pedunculate Oak, Common Oak
10	<i>Salix alba</i>	Weeping Willow, White Willow

Оскільки ця робота зосереджена на прогнозованих кліматологічних змінах, інші вимоги рослин, наприклад, щодо умов ґрунту чи доступності світла виключаються з аналізу. Тим не менш, на практиці ці фактори також необхідно враховувати при виборі відповідних видів для забезпечення оптимального росту. Для оцінки посухостійкості та спекотостійкості обраних порід дерев було проведено великий огляд літератури. Джерела інформації включають бази даних або публікації, які порівнюють деякі або всі десять видів, а також окремі тематичні дослідження, які спеціально зосереджені на одному або кількох з них. Як визнає Віттіг (2008), наукова література досі зосереджувала увагу більше на вуличних деревах, ніж на деревах у парках. Для того, щоб зібрати достатньо відповідної інформації, ця дипломна робота спирається також на іншу літературу, напр. з акцентом на вуличні дерева або лісове господарство. Він також включає результати досліджень конкретних стадій росту, наприклад. на саджанцях, навіть якщо вони спочатку можуть здатися менш актуальними в міському контексті. Більшість міських дерев культивується в розсадниках і згодом переміщується до місця призначення в межах міста (Konijnendijk et al. 2005). Незважаючи на те, що вирощування може відбуватися за межами міста, на породи дерев також впливають зміни кліматичних умов. Якщо вони дуже чутливі до спеки та посухи на ранніх стадіях росту, деякі особини можуть не вижити або проявляти ознаки

пошкодження, які є небажаними з точки зору життєвої сили та естетики. Це небажано в міському контексті і може призвести до підвищення витрат на вирощування необхідної кількості життєво важливих дерев і може вплинути на якість вирощуваних дерев. Тому не слід повністю залишати відповідні висновки про саджанці дерев.



Acer platanoides



Acer pseudoplatanus



Aesculus hippocastanum



Alnus glutinosa



Betula pendula



Fagus sylvatica



Fraxinus excelsior



Populus nigra



Quercus robur



Salix alba

Рис. 8. Фотографії листя десяти вибраних видів дерев. Джерело: власні фото.

4.2. Стійкість до посухи та теплового стресу

4.2.1. *Acer platanoides*

Клен норвезький (*Acer platanoides*) є рідним для великих територій Центральної та Північної Європи, Кавказу та Малої Азії, але також був завезений у Західну Європу та Північну Америку. У порівнянні з яворовим кленом (*Acer pseudoplatanus*), *A. platanoides* має більшу експансію до Північної та Північно-Східної Європи, але як типове низинне дерево не досягає таких високих висот, як його родич (рідко вище 1000 м над рівнем моря) (BWV 2006a, Шмідт і Ролофф 1998). Оскільки *A. platanoides* потребує тепла, він віддає перевагу помірно-континентальному клімату з теплим літом. Найкращі умови вирощування – на свіжому або помірно вологому і пухкому ґрунті.

За даними GALK (2015), *A. platanoides* є термостійким. Порівняно з *A. pseudoplatanus*, він менш вимогливий з точки зору постачання води та поживних речовин (BWV 2006a, Breunig et al. 2002, Schmidt & Roloff 1998). Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) класифікує *A. platanoides* як помірно толерантний, маючи на увазі, що він може переносити приблизно один місяць посухи, якщо вміст вологи в ґрунті знизиться до рівня навколо постійної точки в'янення. Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), він також підходить для сухих і дуже сухих ділянок. Так само, Roloff (2013a) стверджує, що *A. platanoides* не чутливий до посухи і має високу адаптацію до стресу від посухи. З іншого боку, LÖBF (2001) класифікує сухі та дуже сухі ділянки як непридатні та повідомляє про найкращі умови вирощування для злегка вологого або вологого ґрунту. Карон та ін. (2015) досліджували вплив високої температури та посухи на схожість та виживання розсади *A. platanoides* та *A. pseudoplatanus*. Вони прийшли до висновку, що на обидва види можуть негативно вплинути підвищення температури та зниження вологості ґрунту. Однак ефект був сильнішим для *A. pseudoplatanus*, тоді як *A. platanoides* показав вищий успіх проростання, а сходи були в середньому більшими з більшою біомасою коренів. Більша коренева система може

полегшити поглинання води в сухих умовах. Тим не менш, GALK (2015) описує *A. platanoides* як термофільний і терmostійкий.

У міських районах норвезький клен популярний завдяки своєму вражаючому цвітінню і плодоношенню, а також вищій посухостійкості порівняно з *A. pseudoplatanus* (Schmidt & Roloff 1998). Оскільки на *A. platanoides* можуть негативно вплинути високі температури та більш серйозна посуха, більший об'єм ґрунту та низький відсоток герметичних поверхонь є сприятливими для вирощування в містах (Gillner 2012). За даними Roloff et al. (2009) та Roloff (2013a), *A. platanoides* все ще можна використовувати в міських зелених насадженнях у майбутньому, хоча він лише обмежено придатний як придорожня рослинність.

4.2.2. *Acer pseudoplatanus*

Природна зона явора (*Acer pseudoplatanus*) включає гори Східної, Центральної та Південної Європи. Цей вид віддає перевагу субатлантичний і вологий клімат, райони з великою кількістю опадів і помірно вологий або вологий лужний ґрунт (Aid 2014, Schmidt & Roloff 2009). Тому він має свій оптимум на гірських пасовищах і, таким чином, досягає більших висот, ніж будь-який інший вид *Acer* та більшість інших широколистяних видів (до 1800 м) (Schmidt & Roloff 2009). Однак він також зустрічається в лужних низовинах Північно-Німецької рівнини (Aid 2014). Його екологічні вимоги нагадують вимоги *F. excelsior*. Для гарного росту *A. pseudoplatanus* має відносно високі вимоги до поживних речовин і водопостачання, тому уникає сухих і кислих ґрунтів (Aid 2014). З іншого боку, він також уникає заболочених і затоплених ділянок (Breunig et al. 2002).

За даними Weber-Blaschke et al. (2008), водопостачання є особливо важливим протягом перших років для забезпечення успішного заснування. Вищі потреби у воді порівняно з *A. platanoides* можуть спричинити проблеми для явора, особливо в низинах та міських районах. Ця обставина ускладнюється його вимогою до великого простору для вкорінення. У міських районах, де простір для вкорінення часто обмежений, стрес від

посухи може посилюватися (Schmidt & Roloff 2009, Schneidewind 2004). Пізні дослідження повідомляють про чутливість платана до посухи (наприклад, Scherrer et al. 2011, Köcher et al. 2009, Weber-Blaschke et al. 2008, Hölscher et al. 2005, Lemoine et al. 2001). За даними Lemoine et al. (2001), він споживає воду і демонструє високу вразливість до кавітації посухи. Було виявлено, що затримка росту та передчасне старіння спостерігаються на надзвичайно жарких і сухих місцях (Schneidewind 2004). Як правило, *A. pseudoplatanus* не є серйозною загрозою для шкідників, проте водний стрес може підвищити сприйнятливості дерева до грибків (Schmidt & Roloff 2009).

У кількох тематичних дослідженнях повідомляють про негативний вплив спеки та посухи: за даними Gurk & Hepp (2015), *A. pseudoplatanus* чутливий до тепла. Schneidewind (2004) спостерігав пошкодження від сонячних опіків і навіть гине у молодих платанів за тривалих спекотних і сухих умов. Особливо серйозними були пошкодження на відкритих місцях, таких як південні схили та вершини пагорбів. У дослідженні Мюррея (1978) спостерігалось загибель кори після теплих років з інтенсивними умовами посухи. Однак залишалося незрозумілим, чи була загибель кори прямим наслідком посухи чи вторинним ефектом спостережуваної грибкової атаки після посухи. Вимірювання біомаси, проведені Khalil & Grace (1992), вказують на зміну ваги під час посухи від біомаси пагонів до кореневої. Загальна біомаса залишилася незмінною. Дослідження виявило збільшення біомаси коренів і змінений розподіл коренів в умовах посухи. Одночасно зменшується розширення пагонів і листків. Вимірювання потоку соку за Scherrer et al. (2011) виявили значне зниження сокоруху за тривалої посухи (22 дні). Зменшення були більш вираженими на досить сухих ділянках порівняно з досить вологими місцями дослідження. Stöhr (2003) також повідомляє про зменшення сокоруху протягом дня внаслідок закриття продихів.

A. pseudoplatanus часто використовується як міське дерево через його здатність зв'язувати частки (наприклад, озон і оксид азоту) і зменшувати шум (Schmidt & Roloff 2009). Тим не менш, через вищезгадану чутливість до

посухи, Gillner (2012) пропонує обмеження для використання в міських районах. Його слід використовувати тільки в парках або інших зелених зонах з більш сприятливими умовами вирощування, ніж на узбіччях доріг. Сьогодні він популярний в міських парках і зелених зонах і входить до числа найбільш часто використовуваних порід дерев у містах (Schmidt & Roloff 2009). Оскільки *A. pseudoplatanus* чутливий до накопичення тепла та ущільнення ґрунтів, його придатність для дорожнього простору обмежена (Schneidewind 2004). Крім того, в останні роки спостерігалися втрати життєздатності та зростання рівня пошкоджень, які були пов'язані з більшою потребою у воді явора порівняно з іншими видами (Schmidt & Roloff 2009). Фальк та ін. (2013) бачать лише низький ризик вирощування за нинішніх умов. Незважаючи на це, у 2100 році передбачається підвищений ризик для *A. pseudoplatanus* при прогнозованому потеплінні та посиленні стресу від посухи. Це відповідає вищезгаданім джерелам, які класифікують *A. pseudoplatanus* як помірно чутливі до посухи та спеки види та через спостережуване збільшення збитків від посухи та спеки.

4.2.3. *Aesculus hippocastanum*

Звичайний кінський каштан (*Aesculus hippocastanum*) походить з гірських районів Балканського півострова. Однак він був завезений до Центральної Європи, де він широко поширений сьогодні (BWV 2006b, Schmidt & Roloff 1996). Природно, в основному зустрічається в частково затінених, захищених від вітру місцях на висоті до 1300 м. *A. hippocastanum* віддає перевагу вологим і теплим місцям. Незважаючи на це, він має велику екологічну амплітуду і може впоратися з різними кліматичними умовами. Крім того, він невибагливий з точки зору поживних речовин ґрунту (BWV 2006b, Schmidt & Roloff 1996). Проте звичайний кінський каштан чутливий до дорожньої солі, посухи верхніх шарів ґрунту та перезволоження, що може негативно вплинути на дерево (Fischer 2005). Будучи економічно нецікавим для лісового господарства, *A. hippocastanum* в основному використовується

як міське дерево в Центральній Європі, насамперед через його потенціал затінення та естетичну цінність (Roloff 2005, Schmidt & Roloff 1996). Карлінський та ін. (2014) повідомляють про високий ступінь пластичності коренів, які можуть добре адаптуватися до сільських, а також міських ґрунтових умов.

За даними Комісії з лісового господарства Великобританії (2015), *A. hippocastanum* лише помірно толерантний до посухи. Він може переносити приблизно один місяць посухи, якщо вміст вологи в ґрунті знизити до рівня навколо точки постійного в'янення. Потреба у воді та чутливість до посухи описані як помірні. Загалом, він класифікується як чутливий до посухи, а не посухостійкий (Roloff 2013a). Roloff та ін. (2009) також класифікують *A. hippocastanum* в останню категорію щодо посухостійкості, оцінюючи вид як малопридатний для міських територій в умовах зростаючої посухи. Останніми роками інвазивна мінерка кінського каштана (*Cameraria ohridella*) заражає все більшу частину популяції, завдаючи в основному естетичних пошкоджень (Schmidt & Roloff 1996). *A. hippocastanum* може впоратися з інвазією шкідників без смертельної шкоди протягом кількох років, тим не менш, повторний стрес у поєднанні зі стресом від посухи або забрудненням сіллу в міських районах може серйозно послабити дерево та зменшити репродуктивний потенціал (Aas & Lauerer 2005, Schmidt & Roloff 1996).). На *A. hippocastanum* може негативно вплинути зміна клімату в разі посилення умов посухи через згадану чутливість до посухи та зростання зараження листомінером кінського каштана.

4.2.4. *Alnus glutinosa*

Вільха звичайна (*Alnus glutinosa*; також: вільха чорна) широко поширена по всій Європі, переважно в низинах і нижчих гірських хребтах (Aid 2014, Pietzarka & Roloff 2000). Він потребує достатнього освітлення та тепла протягом вегетаційного періоду, але також добре переносить заморозки та пізні заморозки (BWV 2006c, Walentowski & Ewald 2003, Breunig et al. 2002). *A. glutinosa* витримує температури до 44°C без пошкодження листя (Claessens

et al. 2010). Через його швидке зростання та короткий максимальний термін життя, *A. glutinosa* можна охарактеризувати як перший вид (Pietzarka & Roloff 2000). Він дуже вимогливий з точки зору водопостачання та зволоження ґрунту, оскільки переважно колонізує вологі або тимчасово затоплені ділянки (Claessens et al. 2010, BWV 2006c, Walentowski & Ewald 2003). За даними Claessens et al. (2010), його природний ареал поширення обмежений на Сході, де щорічно випадає менше 500 мм опадів. Висока потреба у воді пов'язана з тим, що вільха звичайна вважається породою дерев з найбільшою транспірацією. Оскільки це дерево не регулює транспірацію, спостерігалось, що випаровування дорівнює загальній річній кількості опадів (Claessens et al. 2010). Таким чином, він дуже чутливий до посухи і, отже, переважно колонізує ділянки вздовж струмків або ґрунтів з достатнім впливом підземних вод (Copolovici et al. 2014, Pietzarka & Roloff 2000). Якщо підземні води недоступні, потрібна більша кількість опадів, інакше *A. glutinosa* страждає від посухи (Claessens et al. 2010). На більш сухих ділянках зростання обмежується або гальмується через порожнину, яка виникає особливо в кореневій системі, яка є більш вразливою до утворення емболій, ніж гілки (Hacke et al. 2014, BWV 2006c).

Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), *A. glutinosa* дуже підходить для вологих і вологих ділянок, але не підходить для злегка сухих і сухих ділянок. Roloff (2013a) описує його адаптацію до посухи як помірну. Тим не менш, автор зазначає, що *A. glutinosa*, як правило, також може процвітати при обмеженій доступності води, але тільки якщо окреме дерево з самого початку пристосувалося до сухих умов. В іншому випадку він більш вимогливий до водопостачання. За даними Claessens et al. (2010), встановлення *A. glutinosa* утруднено на несприятливих ділянках із дефіцитом вологи. Це говорить про те, що вирощування в сухих міських районах є проблематичним. Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) класифікує його як непереносимість, що означає, що він переносить лише короткі періоди посухи і не пересихає ґрунт. В даний час Falk et al. (2013) оцінюють лише

низький ризик вирощування для *A. glutinosa*, але на 2100 рік передбачається підвищений ризик при прогнозованому потеплінні та посиленні стресу від посухи. Через низьку посухостійкість Roloff et al. (2009) класифікують *A. glutinosa* як непридатний для посухи для міських районів під час зміни клімату.

4.2.5. *Betula pendula*

Походячи з Європи, Малої Азії, Кавказу, Північної Персії та Сибіру, береза срібляста (*Betula pendula*) колонізує різноманітні місця проживання, такі як дюни, поляни, пустощі та болота. Володіє відносно широкою екологічною амплітудою. Береза срібляста є популярним видом дерев у міських районах через свою естетичну та культурну цінність, але алергія на пилок берези може бути проблематичною в містах (Roloff 2013a, Roloff & Pietzarka 2000). Як типовий перший вид, він має високу потребу у світлі, але не дуже вимогливий до властивостей ґрунту, тепла та доступності води, а також може рости в більш екстремальних умовах (Roloff & Bonn 2008, Burk 2006, BWV 2006d, Aspelmeier & Leuschner 2005, Roloff & Pietzarka 2000). Отже, *B. pendula* може переносити морози, спеку та шкідників і процвітає на бідних поживними речовинами, сухих і кислих ґрунтах, а також на вологих ґрунтах (Burk 2006, BWV 2006d, Breunig et al. 2002). Однак, з точки зору доступності води, окреме дерево доводиться привчати до сухих умов з раннього віку. Раптове зниження доступності води може спровокувати пожовтіння та скидання листя, оскільки береза срібляста має дуже високу швидкість транспірації (430-480 мм/рік). Таким чином, закриття продихів і в кінцевому підсумку скидання листя необхідні для зменшення втрат на транспірацію (Burk 2006, Roloff & Pietzarka 2000).

Дослідження Aspelmeier & Leuschner (2005) зафіксувало зменшення розмірів листя та швидкості росту у відповідь на умови посухи протягом двох наступних років. Крім того, загальна площа листя була сильно зменшена через зниження росту та осипання листя. У разі зневоднення *B. pendula* може навіть скинути весь крон, який, однак, як виявилось, здатний проростати

заново після повторного поливу. Таким чином, скидання листя служить морфологічною адаптацією до посухи і не обов'язково означає нездатність впоратися з посухою (Aspelmeier & Leuschner 2005). Крім того, дослідження виявило вищу смертність тонких коренів через порожнину та знижений ріст пагонів, що свідчить про те, що виділення вуглецю зміщується в бік кореневої системи. У прикладі Gartner et al. (2009) повідомляє про зниження швидкості потоку соку та транспірації в умовах посухи. *B. pendula* здатна швидко адаптувати транспірацію та потік соку до низької доступності води в ґрунті. Крім того, він може добувати воду з більш глибоких горизонтів ґрунту, ніж ялина, з якою *B. pendula* порівнювали під час дослідження. Завдяки такій адаптації до умов посухи, береза срібляста як типовий піонерський вид може впоратися з несприятливим водопостачанням (Gartner et al. 2009). Бурк (2006) також описує здатність витягувати воду з більш глибоких шарів ґрунту. Крім того, результати дослідження показують, що судини, які повторно заповнюються водою після кавітації, все ще можуть функціонувати після періоду помірного стресу від посухи. Таким же чином вимірювання Fort et al. (1998) виявляють здатність поглинати воду з дуже сухих ґрунтів. Якщо вміст води стає занадто низьким, відбувається скидання листя.

Загалом, *B. pendula* класифікується як дуже придатний для сухих і дуже сухих ділянок (Roloff & Grundmann 2008a), оскільки він має досить високу адаптацію до посухи (Roloff 2013a). Однак слід зазначити, що стійкість до посухи найвища, коли окреме дерево звикло до сухих умов з самого початку. Особи, які пристосовані до кращого водопостачання, також більш вимогливі під час стресу посухи (Roloff 2013a). Комісія з лісового господарства Великобританії (2015), з іншого боку, описує *B. pendula* як непереносимість посухи, маючи на увазі, що вона не переносить тривалі періоди посухи або сильне висихання ґрунту. Ця оцінка відрізняється від вищезгаданих характеристик першого виду та оцінки посухостійкості інших досліджень. Roloff та ін. (2009) класифікують *B. pendula* як придатну для міських територій в умовах зміни клімату з огляду на посухостійкість. Volte та ін.

(2012) оцінюють Берч як «переможця» в умовах зміни клімату.

4.2.6. *Fagus sylvatica*

Через свою високу конкурентоспроможність і тіньовитривалість бук європейський (*Fagus sylvatica*, також: бук звичайний) належить до найпоширеніших лісових дерев і є одним з економічно найважливіших широколистяних дерев у Європі (Burk 2006, Felbermeier & Mosandl 2002). Він зустрічається по всій Центральній Європі від Північної Іспанії до Південної Швеції, Балкан і Західної Росії (BWV 2006e). *F. sylvatica* віддає перевагу помірно-помірно теплого клімату з м'якою зимою і без характерних періодів посухи. Таким чином, він надає перевагу морському клімату порівняно з континентальним (BWV 2006e, Felbermeier & Mosandl 2002). Незважаючи на те, що бук європейський перевершує більшість інших видів дерев у середніх умовах (не надто вологий і не надто сухий), він чутливий до посухи, повеней і морозів. Таким чином, розриви виникають у межах розподілу на дуже сухих або заболочених ділянках і регіонах із занадто суворими зимами (Muck et al. 2009, Felbermeier & Mosandl 2002).

За даними Bayerischer Waldbesitzerverband e.V. (2006a), річна кількість опадів має становити не менше 600 мм. Рекомендації Aid (2014) проти висадки *F. sylvatica* на ділянках з кількістю опадів нижче 250 мм у період з травня по вересень. Вид особливо чутливий до посухи на початку літа (Muck et al. 2009). *F. sylvatica* знаходить оптимальні умови зростання на глибоких, пухких, лужних і вологих ґрунтах (BWV 2006e). Хоча бук європейський часто використовується для міських парків, він не придатний як придорожня рослинність, через свою чутливість до посухи та дорожньої солі (Gillner 2012, Hölscher et al. 2005, Felbermeier & Mosandl 2002). За даними Gurk & Hepp (2015) та Rennenberg et al. (2006), *F. Sylvatica* не переносить теплового стресу. Як правило, кількість серйозних шкідників досить низька (Felbermeier & Mosandl 2002).

Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) класифікує *F. sylvatica* як непереносимий посухи. Згідно з Roloff (2013a), адаптація до

стресу від посухи також є лише помірною. Roloff & Grundmann (2008a) характеризують злегка сухі ділянки як придатні. Проте сухі та дуже сухі ділянки вважаються лише обмежено придатними. Основною причиною сприйнятливості до посухи є досить велика площа листя, високий ризик кавітації та тонка коренева система, яка, здається, лише обмежено пристосована до посухи. За даними Leuschner (2009), молоді дерева *F. sylvatica* чутливі як до ґрунтової посухи, так і до сухого навколишнього повітря. На відміну від багатьох досліджень, які характеризують *F. sylvatica* як чутливу до посухи (наприклад, Aid 2014, Berry et al. 2012, Gillner 2012, Muck et al. 2009, Friedrichs 2008, Czajkowski та ін. 2005, Felbermeier та ін. . 2000), інші автори надають європейському буку вищу стійкість до посухи (Roloff & Grundmann 2008a, Dittmar & Elling 2007, Gallé & Feller 2007, Nahm et al. 2006, Dittmar et al. 2003). (Roloff & Grundmann 2008a) стверджують, що потенціал адаптації до стресу від посухи часто недооцінюється, оскільки *F. sylvatica* може адаптуватися до тимчасових умов посухи, використовуючи оборотні морфологічні зміни, такі як зміни співвідношення коренів і пагонів, оскільки він має широку генетичну мінливість.

Окрім цих суперечливих припущень, є докази важливості походження у реакції на посуху (Gillner 2012, Seifert 2011, Lenzion & Leuschner 2008). *F. sylvatica* має широку генетичну різноманітність (Roloff & Grundmann 2008a, Suttmöller et al. 2008). Походження з більш сухих регіонів показують вищу ефективність використання води та вищу стійкість до посухи. Різниця в чутливості до посухи в різних походженнях підтверджується дослідженням Fotelli et al. (2009), які повідомляють про відсутність обмежень, пов'язаних з посухою в Греції за умов, подібних до тих, що викликають стрес для бука в центральноєвропейських місцях, де посухи є менш поширеними. За даними Seifert (2011), екофізіологічні реакції популяцій бука в Європі відрізняються залежно від їх розташування, хоча стресові умови подібні. Навіть у Німеччині про різні екотипи з різною чутливістю до посухи повідомляють Peuke & Rennenberg (2004) та Burk (2006). García-Plazaola & Becerril (2000)

описують відмінності в реакціях на посуху між різними походженнями, що спричиняє різні рівні толерантності до посухи залежно від їхнього ступеня морфологічної адаптації. Південні буки краще пристосовані до посухи, фотоінгібіторної травми та пошкодження озоном, ніж північні буки. Високий ступінь пластичності тонких коренів було виявлено поперек градієнта опадів (Seifert 2011, Meier & Leuschner 2008). Відповідно до цих результатів, можливо, буде необхідно додатково розрізняти різні походження при аналізі *F. sylvatica* на предмет посухостійкості. Оскільки більш посухостійкі походження дають саджанці з вищою толерантністю (Seifert 2011), можна розглянути можливість використання саджанців із більш посушливих регіонів, які краще справляються з посухою, для міських районів, які страждають від кліматичних змін.

Щодо необхідної річної кількості опадів, то в літературі можна знайти різні значення, що знову ж таки можна віднести до описаного різновиду чутливості до посухи. Burk (2006) порівнює різні дослідження, які припускають мінімальну річну суму опадів від 471 мм до 600-700 мм на рік. Внаслідок цього виникають розбіжності щодо необхідної кількості опадів. Різні вимоги до опадів можуть виникати через різні вимоги різних походжень. У будь-якому випадку, Burk (2006) вказує на важливість інших факторів навколишнього середовища, таких як стан ґрунту. Suttmöller та ін. (2008) зазначають, що доступність ґрунтової води є обмежуючим фактором для розподілу. Однієї кліматичної інформації недостатньо, щоб передбачити здатність виду пристосовуватися до майбутніх умов. Проте дослідження van der Werf et al. (2007) визначає зв'язок між зростанням *F. sylvatica* і температурою попереднього вегетаційного сезону, а також червневими температурами поточного року. У той час як багато досліджень зосереджуються на впливі ґрунтової посухи, Lendzion & Leuschner (2008) посиляються на наслідки збільшення дефіциту насиченості повітря водяною парою, що може стати більш важливим у разі майбутніх змін клімату.

Незалежно від порога, під яким бук європейський страждає від спеки та

стресу від посухи, було помічено кілька ознак пошкодження. Дослідження випадків вкрай посушливих років і відповідних наступних років показують можливий вплив посухи. Зменшення зростання внаслідок посухи спостерігалось в різних дослідженнях (Bolte et al. 2012, Michelot et al. 2012, Meinardus & Bräuning 2011, Scharnweber et al. 2011, Seifert 2011, Grundmann et al. 2008). Аналіз кілець дерев та вказівних років виявив вплив опадів поточного року. Ще більш виражений позитивний зв'язок було виявлено між радіальним зростанням та кількістю опадів за попереднє літо. Це свідчить про те, що рясні опади протягом попереднього літа сприяють зростанню, тоді як посуха протягом попереднього літа гальмує ріст (Michelot et al. 2012, Meinardus & Bräuning 2011, Grundmann et al. 2008, Geßler et al. 2006, Czajkowski et al. 2005). За даними Bolte et al. (2012) очікується, що ризик втрати живучості зросте, якщо згодом виникнуть кілька років несприятливих умов без часу на відновлення.

Також була виявлена залежність між зростанням і температурою. Зростання негативно корелює з максимальними температурами попереднього серпня та поточного червня та липня, тобто занадто високі температури можуть обмежувати зростання (Michelot et al. 2012). За даними Felbermeier & Mosandl (2002), висока температура вище 47 °C є смертельною для листя *F. sylvatica*. Suttmöller та ін. (2008) визначають континентальні умови з липневими середніми температурами вище 19 °C як одним обмежуючим фактором для поширення. Тим не менш, більшість досліджуваних досліджень зосереджені на впливі посухи.

Подальші реакції на посуху, окрім зниження росту, включають раннє скидання листя влітку, порожнину, потовщення кутикули, пожовтіння і згорання листя, а також деградацію хлоропластів (Burk 2006, Felbermeier & Mosandl 2002). За даними Leuschner et al. (2001), різні органи і процеси дерев демонструють різну чутливість до ґрунтової посухи, тонкі корені та стебла є більш чутливими, ніж фотосинтез та ріст листя. Felbermeier & Mosandl (2002) повідомляють, що букі залишаються стерильними або передчасно обпадають

у посушливе літо. Більше того, водний потенціал листя перед світанком показав лише низьке відновлення протягом кількох днів посухи (Gillner 2012). Відповідно, Köcher et al. (2009) повідомляють про нездатність *F. sylvatica* стабілізувати водний потенціал листя перед світанком в умовах ґрунтової посухи, що означає, що дерево не може адекватно компенсувати втрату води вдень протягом ночі. Крім того, на відміну від інших видів дерев, *F. sylvatica*, здається, не має хорошої здатності до осмотичного регулювання в умовах посухи (Lendzion & Leuschner 2008).

На різних німецьких ділянках дефоліація крони спостерігалася у 2004 році після літньої посухи 2003 року (MELUR 2013, MLR Баден-Вюртемберг 2013, NW-FVA 2013a, BMELV 2012). Незважаючи на те, що ситуація покращилася, повне одужання не було досягнуто навіть через кілька років (BMELV 2012). Тим не менш, Bolte et al. (2012) нагадують, що досі невідомо, чи є дефоліація пошкодженням *F. sylvatica*, чи необхідною формою адаптації. Крім того, NWFVA (2013b) згадує збільшення сильного плодоношення протягом останніх десятиліть, що пояснюється накопиченням теплих років, оскільки інтенсивне цвітіння та плодоношення часто спричиняються високими температурами в попередньому році. У роки з сильним плодоношенням необхідна більша кількість запасних речовин, тому менше запасів доступно для інших процесів (Suttmöller et al. 2008). З цієї причини рідкісне листя не обов'язково є пошкодженням від посухи, але може бути наслідком інтенсивного плодоношення (MLR Baden-Württemberg 2013).

У кількох дослідженнях очікується зниження тенденцій зростання, втрат життєвих сил та/або зменшення придатності та чисельності видів у разі все більш спекотних і сухих умов (Carón et al. 2015, Scharnweber et al. 2011, Leuschner 2009, Suttmöller et al. 2008, Geßler et al. 2006). Згідно з Leuschner (2009), посухи та теплові хвилі будуть домінуючими впливами в майбутньому з більш серйозними впливами, ніж інші фактори, напр. забруднення озоном і ґрунтів. Тому автор рекомендує утриматися від посадки *F. sylvatica* на територіях з річною кількістю опадів менше 650 мм у майбутньому, а також у

регіонах, де очікується зниження опадів протягом вегетаційного періоду. Roloff & Grundmann (2008a) припускають, що частини Бранденбурга та Саксонії можуть частково стати занадто сухими для *F. sylvatica* в майбутньому.

З іншого боку, Scharnweber et al. (2011) радять враховувати відмінності між походженням щодо посухостійкості та не недооцінювати адаптаційний потенціал популяцій бука. Геслер та ін. (2006) додатково вказують на те, що інші фактори навколишнього середовища, такі як характеристики ґрунту, також впливають на специфічний для ділянки ефект посухи. Як свідчить Gärtner et al. (2008), майбутнє *F. sylvatica* в умовах зміни клімату все ще обговорюється. Незважаючи на те, що деякі дослідження очікують збільшення в теплих умовах, деякі інші підтримують припущення, що збільшення посухи та теплового стресу негативно вплине на вид. Є лише консенсус, що сильний водний стрес загалом знижує ріст. Тим не менш, залишається питання, чи будуть майбутні умови в певному місці занадто суворими, чи *F. sylvatica* зможе адаптуватися.

4.2.7. *Fraxinus excelsior*

Ясен європейський (*Fraxinus excelsior*; також: Ясен звичайний) поширений у великій частині Європи від Шотландії та Південної Скандинавії до Північної Іспанії, Південної Італії, Західної Росії та Кавказу (BWV 2006f, Stöhr 2003). Його основна територія розташована в низинах до передгірних районів із субатлантичним або субсередземноморським кліматом (Aid 2014). Хоча *F. excelsior* толерантний до тіні в молодості, вид стає більш вимогливим до світла з старшим віком (Clark 2013, Roloff & Pietzarka 1997). *F. excelsior* характеризується широкою екологічною амплітудою, що дозволяє рости в різних кліматичних, ґрунтових і водних умовах (Clark 2013, Tissier et al. 2004, Stöhr 2003, Marigo et al. 2000). Зустрічається на вологих, багатих поживними речовинами ґрунтах, до певної міри навіть під впливом затоку, на заплавах, а також на сухих ділянках із тимчасовим стресом від посухи, наприклад, на вершинах пагорбів з неглибоким ґрунтом (Kölling & Walentowski 2001, Roloff

& Pietzarka 1997). *F. excelsior* чутливий до заморозків і пізніх заморозків і віддає перевагу теплим місцям (Breunig et al. 2002, Roloff & Pietzarka 1997). GALK (2015) описує його як терmostійкий. За даними Roloff & Pietzarka (1997), *F. excelsior* має впоратися з низкою патогенів, але жоден з них на даний момент не загрожує його існуванню. Через його стійкість до посухи, дорожньої солі, ущільнення ґрунту та забруднення, його естетичну цінність та відсутність серйозних захворювань або проблем із патогенами, Percival et al. (2006) рекомендують його для міських районів. У міських районах його часто використовують як вуличне дерево або в зелених насадженнях (Roloff & Pietzarka 1997).

Деякі автори описують європейський ясен як чутливий до посухи та вказують на його високу потребу у воді (Aid 2014, Weber-Blaschke et al. 2008, BWV 2006f, Kölling & Walentowski 2001, Roloff & Pietzarka 1997). З іншого боку, інші автори описують *F. excelsior* як посухостійку (наприклад, Roloff 2013a, Scherrer et al. 2011, Lemoine et al. 2001). Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) класифікує його як непереносимий посухи, маючи на увазі, що він не переносить тривалі періоди посухи або сильне висихання ґрунту. Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), *F. excelsior* підходить для помірно сухих ділянок, але лише обмежено підходить для сухих до дуже сухих ділянок. Таким чином, дуже сухі ділянки не рекомендується, оскільки він страждає в умовах тривалої посухи і реагує на раннє скидання листя (Roloff & Pietzarka 1997). За даними Bayerischer Waldbesitzerverband e.V. (2006b), ясен європейський, як правило, стійкий до різних рівнів вологості ґрунту, але чутливий до посухи. Roloff & Pietzarka (1997) та Weber-Blaschke et al. (2008) вказують на залежність від опадів у травні та червні, незалежно від запасів води в ґрунті, оскільки вона потребує великої кількості води в період до бутонізації. Як правило, в літературі існує згода, що *F. excelsior* має дивовижну здатність реагувати на різні умови навколишнього середовища завдяки своїй великій екологічній гнучкості (Clark 2013, Stöhr & Lösch 2004, Stöhr 2003, Marigo et al. 2000, Roloff &

Pietzarka 1997). Незважаючи на дуже високу швидкість транспірації (продихання $5-12 \text{ ммоль м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) і низьку ефективність використання води, *F. excelsior*, здається, добре пристосований до помірного стресу від посухи (Roloff 2013a, Stöhr & Lösch 2004, Guicherd та ін. 1997).

Під впливом водного стресу *F. excelsior* адаптується за допомогою осмотичного регулювання та листя, які переносять низький водний потенціал, тобто використовуючи анізогідричну, а не ізогідричну стратегію (Lendzion & Leuschner 2008, Stöhr & Lösch 2004, Marigo et al. 2000, Guicherd et al.) літня посуха 2006 року щільність потоку соку залишалася постійною протягом усього періоду посухи, тоді як *F. excelsior* розвивав і витримував низький водний потенціал листя, зберігаючи достатню провідність листя та засвоюючи достатню кількість CO_2 . Крім того, тонка коренева система залишалася життєво важливою. У порівнянні з іншими видами, такими як бук і явір, *F. excelsior* зміг найкраще впоратися з умовами тривалої посухи (Köcher et al. 2009). Шеррер та ін. (2011) повідомляють, що на *F. excelsior* не вплинула 22-денна посуха без вимірюваного зниження швидкості потоку соку. З іншого боку, Stöhr (2003) спостерігав зменшення потоку соку протягом дня, але водний потенціал листя та стебла також був низьким. Крім того, вимірний постійний потік соку ксилеми в нічний час пояснюється повторним заповненням водних запасів дерева.

Щодо майбутніх очікувань, Bolte et al. (2012) припускають дещо позитивне майбутнє для *F. excelsior* порівняно з іншими видами, які страждають більше в теплих і сухих умовах. За даними Scherrer et al. (2011), його посухостійкість буде корисною в найближчому майбутньому. Інші дослідження, що стосуються майбутнього *F. excelsior* у Великобританії, однак, є більш критичними і очікують, що майбутні умови стануть більш невідповідними для європейського ясеня (Berry et al. 2012, Broadmeadow et al. 2005). Судячи з різних наукових результатів, які в цілому повідомляють про дуже ефективні механізми адаптації до посухи та вказують на зниження придатності до дуже сухих умов, можна припустити, що *F. excelsior* –

залежно від місцевих умов – зможе краще справлятися з більш сухими та теплими майбутні умови, ніж деякі інші види. Тим не менш, він також може постраждати, якщо стрес від посухи стане занадто серйозним.

4.2.8. *Populus nigra*

Через велику кількість гібридів і насаджень тополі чорної (*Populus nigra*) її природне середовище існування важко визначити. Крім того, чисті особини *P. nigra* рідко зустрічаються в деяких регіонах через високий ступінь гібридизації. Сьогодні він широко поширений в Європі, Північній Африці, а також у Західній і Центральній Азії і зустрічається в низовинах до колінських і підгірських регіонів (Huber 2010, BWV 2006g, Weisgerber 1999). *P. nigra* воліє теплий помірний або бореальний клімат з достатнім водопостачанням і доступністю світла. Він вимагає високої доступності поживних речовин і хорошої аерації ґрунту (Roloff & Bonn 2008). Крім того, оскільки вона пристосована до високої вологості ґрунту та тимчасового затоплення протягом кількох тижнів, чорна тополя часто колонізує заплави річок (Huber 2010, Weisgerber 1999). Вона не тільки переносить високу вологість, але навіть вимагає її, оскільки належить до місцевих видів дерев, найбільш чутливих до посухи (Marron et al. 2006, Monclus et al. 2006, BWV 2006g). У порівнянні з іншими місцевими видами тополі чорна тополя є найбільш чутливою до посухи (BWV 2006g). Типовий для піонерського виду, *P. nigra* має дуже високі темпи зростання, тому йому потрібна така велика кількість води. Крім того, вона демонструє високий ризик кавітації (Durand et al. 2011, Fichot et al. 2010). Одним із побічних ефектів дефіциту води є зниження стійкості до таких захворювань, як некроз кори, спричинений грибом *Cryptodiaporthe populea* (Weisgerber 1999). Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), *P. nigra* не підходить для сухих або дуже сухих ділянок, але підходить для вологих і помірно сухих ділянок. Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) вважає чорну тополь нестерпною до посухи, маючи на увазі, що вона не переносить тривалі періоди посухи або сильне висихання ґрунту. Крім того, він класифікується як чутливий до

посухи за (Roloff 2013a).

Дослідження Centritto et al. (2011) спостерігали зниження фотосинтетичної здатності як реакцію на стрес від посухи, яка, однак, відновлювалася приблизно через тиждень після повторного поливу. Підвищена температура водночас посилювала світле і темне дихання, викликаючи збільшення відношення дихання до фотосинтезу. Як наслідок, *P. nigra* сильно постраждає за більш сухих і теплих кліматичних умов у майбутньому Durand et al. (2011) виявили, що листя постраждали від посухи до камбію. *P. nigra* – це вид, який містить різноманітні гібриди та значні генотипні варіації (Fichot et al. 2010). Monclus та співавт. дослідили різні генотипи та гібриди на їхню посухостійкість та ефективність використання води. (2005). Дослідження зробило висновок, що *P. nigra* містить ряд різних посухостійких. Такий же висновок був зроблений у дослідженні Regier et al. (2009), які порівнювали клон з більш посушливого регіону з клоном з більш вологого регіону. Останній виявляли симптоми стресу від посухи, тоді як перший, здавалося, краще справлявся з умовами посухи. Таким чином, для насадження *P. nigra* слід використовувати відповідний місцевим умовам тип. Щодо майбутніх кліматичних змін, Monclus et al. (2005) вважає можливе збільшення випадків посухи проблематичним. Таким чином, плантації повинні зосередитися на менш чутливих до посухи гібридах з кращою ефективністю використання води. Судячи з наявної літератури, *P. nigra* є одним із найбільш чутливих до посухи серед відібраних дерев. З цієї причини цей вид не є найкращим вибором у майбутньому в міському контексті, який уже характеризується низькою доступністю води.

4.2.9. *Quercus robur*

Дуб звичайний (*Quercus robur*; також: дуб англійський, дуб черешчатий) — одне з найбільш поширених та економічно важливих лісових дерев Центральної Європи. Він поширений на величезних частинах Європи з північними межами в Шотландії, Ірландії та Південній Скандинавії, східними межами на Уральських горах і південними межами в Південній Франції, Північній Іспанії та Португалії (Aas 2002). Основна зона поширення знаходиться в регіонах з низькою висотою з помірно-континентальним кліматом Центральної Європи (Aid 2014). *Q. robur* віддає перевагу тепле і не надто посушливе літо і вимогливий з точки зору доступності поживних речовин, світла та вологості ґрунту (Aid 2014, BWV 2006h, Aas 2002). За даними GALK (2015) і Gurk & Nepp (2015), він любить тепло. Він також може переносити тимчасові повені (Aas 2002). Хоча дуб звичайний можна знайти на ділянках з різними характеристиками ґрунту від вологих, багатих поживними речовинами, лужних ґрунтів до сухих, бідних поживними речовинами, кислих ґрунтів, він має свій оптимальний ріст за середніх умов щодо доступності поживних речовин і води (BWV 2006h, Aas 2002, Breunig та ін., 2002). Однак у природних умовах його зазвичай випереджає *F. sylvatica* на найбільш сприятливих ділянках через більший попит на світло. Таким чином, дуб звичайний зазвичай також зустрічається в трохи більш екстремальних місцях існування (Aas 2002).

Q. robur вважається помірно толерантним до посухи, що означає, що він витримує періоди посухи тривалістю до одного місяця зі зниженням вологості ґрунту до рівня навколо точки постійного в'янення (UK Forestry Commission 2015). Roloff (2013a) класифікує *Q. robur* як нечутливий до посухи і приписує виду хорошу адаптацію до стресу до посухи. Відповідно, Roloff & Grundmann (2008a) класифікує його як придатне для сухих і дуже сухих ділянок. *Q. robur* зазвичай вважається однією з найбільш чутливих до посухи порід дуба порівняно, напр. до також поширених видів *Q. petraea* та *Q. pubescens* (Aid 2014, Arend et al. 2011, Sergeant et al. 2011, Friedrichs et al.

2009, BWV 2006h, Dickson & Tomlinson 1996). Тим не менш, його стійкість до посухи вища, ніж у бука європейського (*F. sylvatica*), іншого економічно важливого лісового дерева в Європі, завдяки його більш глибокій кореневій системі та іншій гідравлічній архітектурі (Bourtsoukidis et al. 2013, Berry et al. 2012, Scharnweber та ін. 2011, Gallé & Feller 2007).

Вплив умов посухи досліджувався в кількох дослідженнях. Реакції включають зниження провідності продихів, зниження водного потенціалу листків і утворення тонких коренів. Згідно з Томасом і Гауслінгом (2000), найважливішим механізмом адаптації, який виникає як при слабкому, так і при сильному стресі від посухи, є зміна співвідношення біомаси від листя до тонкого кореня. Осмотичне регулювання, з іншого боку, спостерігалось лише за слабкої посухи, але не під час сильного стресу від посухи. Тим не менш, Aid (2014) радить не висаджувати *Q. robur* на сухих схилах і сухому піску, бідному поживними речовинами. Крім того, *Q. robur* уникає стресу від посухи за допомогою продихів. Крім того, біохімічний захист листя описано Schwanz et al. (2001). Ризик кавітації є досить низьким за нормальних літніх умов, але збільшується при більш серйозному стресі від посухи та у разі повторюваних посух (Gieger 2002, Epron & Dreyer 1993).

Koller та ін. (2013) повідомляють про необоротне зниження фотосинтетичної активності після тривалого 50-денного стресу від посухи. Крім того, осипання листя може бути наслідком посухи та теплового стресу. Проріджування крони спостерігалось в роки після дуже сухого і теплого літа (Bolte et al. 2012). Дефоліація є більш серйозною, ніж для інших видів лісових дерев, особливо після надзвичайної літньої посухи 2003 року (MIL 2013). van der Werf та ін. (2007), з іншого боку, повідомляють лише про деякі наслідки літньої посухи 2003 року на радіальне зростання морського клімату Нідерландів. Вони припускають, що негативний вплив посухи вищий на надзвичайно сухих ділянках. Це вказує на високу толерантність до помірного стресу від посухи, але підвищення чутливості в важких умовах. сержант та ін. (2011) прийшли до подібного висновку у своєму дослідженні молодих

дерев *Q. robur*. Хоча спочатку *Q. robur* здатний деякий час пристосовуватися до стресу від посухи за рахунок зниження росту, більш важкі та тривалі умови посухи викликали збій механізмів адаптації. Spieß та ін. (2012), однак, спостерігали зростання компенсації при повторному поливі, що вказує на здатність відновлюватися після посухи. Крім того, їхнє дослідження прийшло до висновку, що легкий стрес від посухи протягом тривалого періоду часу може навіть спровокувати адаптацію до посухи.

За даними van der Werf et al. (2007), на зростання *Q. robur* впливають опади та літні температури попереднього вегетаційного періоду. Низька кількість опадів у поточному та попередньому році негативно впливає на *Q. robur* (Sergeant et al. 2011, van der Werf et al. 2007). Сандерс та ін. (2014) виявили зниження приросту нижче 247 мм опадів у період з травня по вересень. Ragazzi та ін. (2002) виявили спад у Північній Італії через посуху в березні та квітні. Згідно з дослідженням, *Q. robur* у цей період потребує опадів не менше 100 мм на місяць. Крім того, грибкова інвазія в наступному році погіршила спостережуваний спад. Однак чутливість людини також залежить від її походження, оскільки було показано, що стійкість до посухи залежить від походження (Arend et al. 2011, Gallé & Feller 2007). Крім обмеження росту, посуха також може зробити *Q. robur* більш вразливим до шкідників, які в іншому випадку занадто слабкі, щоб серйозно вплинути на дерево. Одним із прикладів є хвороба Раптова смерть дуба, спричинена збудником *Phytophthora ramorum* (Sergeant et al. 2011).

В умовах зміни клімату на майбутнє прогнозується незначний позитивний розвиток через більш високу стійкість до спеки та посухи порівняно з іншими лісовими деревами, такими як *F. sylvatica*, більш чутлива до посухи (Arend et al. 2011, Roloff & Grundmann 2008a). Згідно з Roloff & Grundmann (2008a), це дерево виграє від збільшення сухих ділянок, які є занадто сухими для *F. sylvatica*. Це означає, що *Q. robur* може бути альтернативою посадки в лісовому господарстві. Аренд та ін. (2011) також оцінюють менший ризик втрати середовища існування для *Q. robur*, ніж для

F. sylvatica. Порівняно з *Q. petraea*, він, однак, буде страждати більше в надзвичайно сухих умовах (Friedrichs et al. 2009). Шарнвебер та ін. (2011) спостерігали депресії росту, викликані стресом від посухи, і також дійшли висновку, що на *Q. robur* може негативно вплинути більш сухі та теплі майбутні вегетаційні сезони, хоча вважається, що вплив менш виражений, ніж для *F. sylvatica*. Тому Scharnweber et al. (2011) все ще рекомендують *Q. robur*, а не *F. sylvatica* для майбутнього використання.

4.2.10. *Salix alba*

Верба біла (*S. alba*) поширена по всій Європі (крім Британських островів і Скандинавії), Північній Африці, Західній, Південно-Західній і Центральній Азії, а також Західному Сибіру. В основному він зустрічається в умовах помірного субконтинентального клімату (BWV 2006i, Schirmer & Stimm 1999). Як перший вид, він нечутливий до солі та забруднення на промислових майданчиках (Schirmer & Stimm 1999). З точки зору температурних вимог *S. alba* є теплолюбним видом і не переносить пізніх заморозків, оскільки пагони та цвітіння відбуваються досить рано (BWV 2006i, Breunig et al. 2002, Türk 1999). Оскільки він в природі займає ділянки вздовж струмків і річок, він дуже толерантний до повеней і високого рівня ґрунтових вод і віддає перевагу вологим або вологим глибоким ґрунтам (BWV 2006i, Schirmer & Stimm 1999, Türk 1999). Відповідно, *S. alba* є дуже водоемним видом з низькою ефективністю використання води. Таким чином, велике збільшення відбувається лише при оптимальній подачі води. Комісія з лісового господарства Великобританії (2015) класифікує його як непереносимість посухи, маючи на увазі, що він не переносить тривалі періоди посухи або сильне висихання ґрунту. Аналогічно, Roloff & Grundmann (2008a) розглядають дуже сухі та сухі ділянки як непридатні, а вологі та помірно сухі місця лише як обмежено придатні.

На відміну від інших авторів, Roloff (2013a) описує потребу у воді *S. alba* як низьку або помірну і приписує Білій вербі високу адаптацію до стресу від

посухи. У разі стресу від посухи він скидає цілі зелені гілки, щоб зменшити втрати транспірації. Однак це небажано в міських районах з естетичної точки зору. Автор стверджує, що, хоча Біла верба віддає перевагу вологим місцям проживання, вона також здатна впоратися практично з будь-яким іншим місцем проживання. Проте він не часто зустрічається на більш сухих ділянках, оскільки зазвичай його витісняють інші більш конкурентоспроможні види. У порівнянні з іншими дослідженими видами дерев, існує набагато менше досліджень щодо посухостійкості *S. alba*. Це може бути пов'язано з меншим економічним інтересом порівняно з іншими видами, або тому, що зараз він переважно зустрічається на таких ділянках, як береги річок, де стрес від посухи не є найбільш помітною проблемою. The Climate-Species-Matrix Roloff et al. (2009), вважає *S. alba* проблематичною в міських районах у майбутньому щодо посухостійкості. Оскільки більшість інших досліджень також вказують на досить високу чутливість до посухи, найкращою майбутньою стратегією є обережність щодо використання *S. alba* в міських районах, особливо в місцях, схильних до посухи.

4.3. Порівняння допусків порід дерев

4.3.1. Різні механізми подолання стресу та фактори, що впливають на толерантність

Дерева можуть адаптуватися до посухи різними способами, напр. покращуючи водний транспорт, зменшуючи площу листя або розширюючи кореневу систему, щоб досягти подальших водойм (Burk 2006). Було встановлено, що кореневі системи розвиваються відповідно до переважних умов ґрунту, напр. тип ґрунту, водозабезпеченість, вологість і запас поживних речовин. При хорошому водозабезпеченні коріння в основному розвиваються у верхніх шарах ґрунту. При зменшенні доступності вологи коренева система розширюється в більш глибокі шари, щоб витягти додаткові запаси води. Це можна розглядати як форму адаптації до ґрунтової посухи (Burk 2006). Посухостійкість зазвичай вище у старих особин, ніж у молодих дерев. Під час посушливих періодів ті види, які особливо толерантні до посухи, зазвичай знижують транспірацію, регулюючи продийну провідність. Більш глибока або розширена коренева система, крім того, дозволяє краще поглинати воду (Siewniak & Kusche 2009). Однак глибокі та розширені коріння можуть створювати труднощі в міських районах, напр. якщо гідравлічні лінії або асфальт пошкоджені (Roloff 2013a).

Транспортування води всередині рослини сильно залежить від градієнта водного потенціалу між ґрунтом та атмосферою. У разі посилення ґрунтової посухи водний потенціал ґрунту падає до більш негативних значень. Підтримка високої водопровідності вздовж градієнта передбачає зниження внутрішнього водного потенціалу рослини. Таким чином, щоб підтримувати транспортування води в дереві, воно також має зменшити водний потенціал у коренях, стеблах і листках. Потенціал кореневої води від -2 до -4 МПа вважаються найнижчими значеннями для Центральної Європи (Roloff 2013b, Burk 2006). Здатність переносити низькі потенціали розглядається як можлива адаптація до стресу від посухи, який може, наприклад, можна побачити у *F. excelsior* (Stöhr & Lösch 2004, Guicherd et al. 1997). У

дослідженні Stöhr (2003) *F. excelsior* показав мінімальний водний потенціал -3,1 МПа всередині стебла і -4,25 МПа в листках, тоді як для *A. pseudoplatanus* не спостерігалось подальшого зниження вище -2 МПа як у стеблі, так і в листках. . Більш недавнє дослідження Köcher et al. (2009) навіть повідомляє про водний потенціал листків до -6 МПа для *F. excelsior*. Таким чином, серед десяти проаналізованих видів досліджуваних видів, саме той може знизити водний потенціал залишок до найнижчих значень.

Проте, якщо умови ґрунтової посухи тривають довший період часу, навіть зниження потенціалу кореневої води недостатньо для підтримки необхідного водопостачання. Як наслідок, континуум рідкої фази порушується і виникає кавітація (Bréda et al. 2006, Burk 2006). Чутливість до кавітації у різних видів різна. У деяких порід дерев посудини можна поповнювати після повторного поливу, тобто тимчасова порожнина змінюється, що вказує на додаткову форму адаптації до посухи (Richter & Kikuta 2014). Інші види, які не можуть впоратися з тимчасовою кавітацією, зазнають серйозної шкоди внаслідок такої посухи. Виявлено високий ризик кавітації, напр. у *P. nigra*, оскільки тополі належать до деревних видів, найбільш вразливих до кавітації (кавітація починається, коли водний потенціал ксилеми досягає від -1 до -1,2 МПа) (Durand et al. 2011, Fichot et al. 2010). Крім того, *A. pseudoplatanus* (Lemoine et al. 2001) і *A. glutinosa* (високо вразливий до потенціалу води ксилеми нижче -1,2 МПа) (Worrall et al. 2010) значно страждають від кавітації. Крім того, вразливість до кавітації може також варіюватися в межах рослини. Наприклад, у *A. glutinosa* коріння більш вразливі, ніж гілки (Häcke et al. 2014).

Фізіологічні реакції на посуху значно відрізняються між різними видами дерев (Ryan 2011). Було визначено дві основні стратегії в умовах посухи, а саме ізогідричний і анізогідричний механізми з різним ступенем обох форм між ними (Ryan 2011, McDowell et al. 2008). Загалом ізоатомні види володіють ефективними механізмами продихальної регуляції транспірації. Вони знижують провідність листків продихів, якщо водний потенціал ґрунту

знижується, тим самим зменшуючи втрати води та запобігаючи зменшенню водного потенціалу листа (McDowell et al. 2008, Stöhr 2003). Крім того, вони часто мають розгалужену кореневу систему, досить дрібне листя та високе співвідношення маси листа до площі (Aroca 2012). Негативною стороною ізогідричної реакції є ризик вуглецевого голодування, оскільки фотосинтез зменшується із закриттям продихів, але дихання рослин все ще відбувається (Allen et al. 2010). Таким чином, витримуючи короткі, але інтенсивні посухи, ізогідричні види особливо страждають в умовах тривалої посухи, коли цього механізму може бути недостатньо для збереження дерева від гідралічного збою (Gill et al. 2013).

Анізогідрні види мають лише обмежену здатність продихів контролювати транспірацію, підтримують більш високу продихову провідність листа і, таким чином, стикаються з більшими втратами води та зниженням водного потенціалу листа, особливо близько полудня. У відповідь вони мають судини, стійкі до кавітації. Крім того, вони можуть реагувати зі зниженням осмотичного потенціалу через їх здатність до осмотичного регулювання (McDowell et al. 2008, Stöhr 2003). Ризик вуглецевого голодування нижчий, ніж для ізоатомних видів, оскільки продихи залишаються відкритими. З іншого боку, анізогідрні види стикаються з більш високим ризиком кавітації, тобто утворення емболій, через що багато з цих видів мають ксилеми, стійкі до кавітації (Allen et al. 2010). Анізогідрики краще справляються з тривалими посухами, але частіше страждають від гідралічного збою під час короткочасних, але особливо інтенсивних посух (Gill et al. 2013).

Як правило, добова амплітуда водного потенціалу листа набагато вища в анізогідричних видів, ніж у ізоатомних видів. Тому ця амплітуда береться як один із показників для класифікації виду як одного, так і іншого. Тим не менш, не існує визначеного порогу для класифікації видів як ізогідричних чи анізогідричних. Досі ведуться дебати щодо деяких видів, які демонструють

поєднання характеристик або де жодна зі стратегій не є особливо вираженою (McDowell et al. 2008, Stöhr 2003). Приклади видів, які класифікуються як ізогідричні, включають *A. pseudoplatanus* (Scherrer et al. 2011, Köcher et al. 2009, Stöhr 2003), *B. pendula* (Zapater et al. 2013, Sellin et al. 2009), *P. nigra* (Herrero et al. 2009). ін., 2013, Coccozza та ін., 2010) та *Q. robur* (Tulik 2014, Urli et al. 2014, Zapater et al. 2013). Для порівняння, *A. glutinosa* (Worrall et al. 2010), *F. excelsior* (Stöhr & Lösch 2004, Stöhr 2003) та *F. sylvatica* (Pretzsch et al. 2014, Rosner 2012) вважаються анізогідричними видами.

Проте сама по собі ізогідрична чи анізогідрична стратегія не дає достатньої інформації про посухостійкість деревних видів. Деякі види, такі як *A. glutinosa*, віддають перевагу вологим або вологим місцям проживання, але все ще описуються як безводні види. Листки *A. glutinosa* не можуть ефективно контролювати транспірацію, що характерно для видів, які потребують води (Claessens et al. 2010). Його ксилема дуже вразлива до кавітації при потенціалах води нижче - 1,2 МПа (Worrall et al. 2010). Оскільки *A. glutinosa* зазвичай колонізує вологе середовище проживання і рідко доводиться впоратися з сильними посухами та дуже низьким потенціалом, ця стратегія все ще підходить у бажаному середовищі. Однак він не підходить для посухих ділянок. Завдяки їхнім стратегіям анізогідричні види зустрічаються частіше в посухих районах порівняно з ізогідричними видами (McDowell et al. 2008).

4.3.2. Порівняння використовуваних у літературі систем класифікації толерантності

Під час огляду літератури стало очевидним, що існує дуже мало досліджень, які насправді можна порівняти один до одного. Причина цього полягає в тому, що тематичні дослідження мають різну спрямованість, використовують різну методологію, вимірюють різні параметри та проводилися на різних місцях і в різний час. Це, звичайно, пов'язано з практичними причинами і не означає, що тематичні дослідження не дають

цінної інформації. Це просто означає, що слід пам'ятати про специфічні відмінності цих досліджень. Оскільки багато місцевих факторів сильно впливають на вплив посухи та спеки на вид, порівняння різних досліджень ще більше ускладнюється.

Крім того, існуючі системи класифікації допусків відрізняються за своїм найменуванням і поділом на класи. Отже, табл. 7 наведено огляд класифікацій та шкал, використаних у відповідних дослідженнях. Вища посухостійкість, вища придатність до сухих середовищ існування, краща адаптація до стресу від посухи та більша придатність як вуличне дерево з обмеженим запасом води розглядаються як позитивні характеристики (забарвлені в темно-зелений колір), оскільки вони є бажаними при виборі видів для міських районах, які зазнають зміни клімату. Навпаки, чутливість до посухи, низька придатність для сухих середовищ існування, низька придатність як вуличне дерево, а також недостатня адаптація до посухи розглядаються як негативні характеристики (забарвлені в темний і світло-оранжевий), оскільки вони небажані для міських дерев під час зміни клімату. Деякі класифікації включали проміжну категорію, яка була зображена жовтим кольором.

табл. 7 Огляд різних класифікацій, що оцінюють посухостійкість та пов'язані параметри (*= немає класифікації в оригінальних джерелах, інформація була зібрана з тексту та поділена на класи).

Source	Parameter	Classes	++	+	0	-	--
A Roloff et al. (2009)	Drought tolerance and the resultant suitability for urban habitats under climate change	1-4	1 very suitable	2 suitable		3 problematic	4 not suitable
B Roloff & Grundmann (2008a)	Applicability for dry to very dry sites in respect to climate change	1-4	1 very suitable	2 suitable		3 limited suitable	4 not suitable
C Ninemets & Valladares (2006), UK Forestry Commission (2015)	Drought tolerance	1-5	5 very tolerant	4 tolerant	3 moderately tolerant	2 intolerant	1 very intolerant
D Roloff (2013a)	Drought stress adaptation *	+ / o / -		+	0	-	
E Roloff (2013a)	Drought stress sensitivity	+ / -		+		- sensitive	
F Bassuk et al. (2009)	Suitable soil moisture conditions (driest possible conditions of the suitable range are used for classification here)	1-12	10-12 prolonged periods of dry soil	7-9 occasional periods of dry soil		4-6 consistently moist, well drained soil	1-3 occasionally saturated or very wet soil
G GALK (2015)	Suitability as street tree	+ / o / -		+	0 limited suitable	- not suitable	
H Other studies cited in section 4.2	Drought tolerance *	+ / o / -		+	0	-	
Own assessment based on literature review	Drought tolerance / Drought sensitivity	1-4	1 very tolerant	2 moderately tolerant		3 moderately sensitive	4 very sensitive

табл. 8 Порівняння деревних порід на основі різних класифікацій щодо посухостійкості та пов'язаних з ними параметрів. Опис класифікацій A-G, а також відповідні параметри відображаються в табл. 7. Джерело H підсумовує подальші окремі випадки. Загальна оцінка була виведена з урахуванням усіх доступних джерел. Проте, через різні критерії класифікації та варіації в експериментальних умовах тематичних досліджень, деякі джерела можуть прийти до різних висновків у порівнянні з іншими оцінками та в порівнянні із загальним рейтингом.

Species	Individual assessments of sources A-H [For detailed explanation of scales see Tab. 7]							Overall assessment	
	suitable	++	+	o	-	--	unsuitable	[n/a]	
	A	B	C	D	E	F	G	H	
<i>A. platanoides</i>									moderately tolerant
<i>A. pseudoplatanus</i>									moderately sensitive
<i>A. hippocastanum</i>									moderately sensitive
<i>A. glutinosa</i>									very sensitive
<i>B. pendula</i>									very tolerant
<i>F. sylvatica</i>									moderately sensitive
<i>F. excelsior</i>									moderately tolerant
<i>P. nigra</i>									very sensitive
<i>Q. robur</i>									moderately tolerant
<i>S. alba</i>									very sensitive

Дуже мало досліджень проводили аналіз прямого впливу тепла на породи дерев. Таким чином, наразі доступно набагато менше інформації про вплив тепла. Тому подібна детальна таблиця стійкості до тепла на даному етапі не наводиться. Після огляду різних класифікацій, наведених у табл. 7, табл. 8 містить порівняння відібраних видів відповідно до цих різних систем класифікації посухостійкості та пов'язаних з ними параметрів. Дослідження оцінювали дещо інші параметри, усі вони пов'язані зі здатністю виду впоратися зі стресом від посухи (наприклад, посухостійкість або придатність для сухих місць проживання).

Bassuk та ін. (2009) описують потреби дерев у вологості ґрунту за шкалою від 1 (іноді насичений або дуже вологий ґрунт) до 12 (тривалі періоди сухого ґрунту), висвітлюючи відповідний діапазон умов, за яких вид

може досить добре вижити. Автори зазначають, що робити абсолютні твердження щодо потреб у воді дуже важко. Тому вони замість цього працюють у відносному масштабі. Отже, загальна оцінка посухостійкості та спекотостійкості в цій дипломній роботі також використовує відносну шкалу замість кількісної класифікації (див. табл. 7, табл. 8 та табл. 9). Включаються чотири категорії: «дуже толерантний», «помірно толерантний», «помірно чутливий» і «дуже чутливий». Через зазначену відсутність визначених порогових значень до цих класів не прикріплено жодних кількісних критеріїв (таких як необхідна мінімальна кількість опадів або поріг шкоди від температури).

табл. 9 Резюме класифікацій посухостійкості та спекотності окремих порід дерев. Він дає загальні ознаки толерантності або чутливості виду до посухи та теплового стресу відповідно. Види відсортовані за алфавітом у кожній категорії; у наказі не вказується подальша оцінка.

Класифікація зосереджена насамперед на Німеччині, тобто очікується, що види, які класифікуються як толерантні, будуть в цілому толерантними до помірних кліматичних умов Центральної Європи. Допуски видів в інших регіонах (наприклад, у більш сухих і теплих районах Середземномор'я) тут не враховуються. Види навмисно були просто відсортовані за алфавітом у межах категорій без додаткової оцінки. Загальна оцінка була виведена з урахуванням усіх цитованих джерел. Однак через різні класифікаційні критерії та відмінності в експериментальних умовах тематичних досліджень деякі джерела можуть прийти до різних висновків порівняно з іншими оцінками та в порівнянні із загальним рейтингом. Запропонована класифікація повинна давати огляд загального консенсусу, знайденого в літературі, хоча в деяких випадках джерела показують досить неоднозначні результати. Враховуючи, що результати тематичного дослідження, крім того, сильно залежать від місцевих умов та експериментальної установки, слід

звернутися до розділів 4.2.1–4.2.10, а також до цитованої літератури, якщо потрібна більш детальна інформація про окремі види.

Порівнюючи різні існуючі схеми класифікації, слід мати на увазі, які параметри оцінюються. Посухостійкість може, напр. не можна ототожнювати з придатністю для сухих місць проживання. Проте можна очікувати, що види дерев з високою посухостійкістю, напр. *B. pendula* або *F. excelsior* — це види, які, як правило, є більш придатними для сухих середовищ існування, ніж ті, чутливі до посухи, напр. *A. glutinosa* або *P. nigra*. Тому можна очікувати, що різні оцінювані параметри доповнюють один одного і можуть бути використані разом, щоб дати загальну оцінку. На основі наявної на даний момент інформації неможливо класифікувати три види (*A. glutinosa*, *P. nigra*, *S. alba*) щодо їх термостійкості. Крім того, поточна література містить деякі суперечливі приклади, і не всі результати повністю відповідають деяким видам. Як видно з табл. 8, джерела розходяться у своїй оцінці в кількох випадках. Як приклад, *A. pseudoplatanus* вважається «непридатним» для міського проживання в умовах зміни клімату за Roloff et al. (2009) за його посухостійкістю. З іншого боку, згідно з Roloff & Grundmann (2008a), він класифікується як придатний для сухих і дуже сухих ділянок. Аналогічно, *F. excelsior* вважається непереносимим до посухи за Niinemets & Valladares (2006), тоді як за Roloff (2013a) він не чутливий до посухи. Можливі пояснення цих відмінностей включають використання різних порогів стійкості до посухи, різні фокуси дослідження, різний вік спостережуваних особин, різні походження або сорти, а також відмінності в географічному положенні та кліматичних умовах.

Наприклад, джерело С (Niinemets & Valladares 2006) використовує п'ять різних класів посухостійкості. Проте всі види, які розглядаються в цій дисертації, поділяються на категорії «помірно толерантні» або «нетерпимі». Джерело А (Roloff et al. 2009), з іншого боку, класифікує види на чотири різні класи, усі вони представлені принаймні одним із десяти видів, які

розглядаються тут. У той час як Niinemets & Valladares (2006) базують свою класифікацію на основі порогових значень опадів, допустимої тривалості посухи та водного потенціалу ґрунту, Roloff et al. (2009) об'єднує існуючі класифікації бажаного середовища проживання, а також ґрунтові та кліматичні фактори в одну оцінку. Використання різних систем класифікації, можливо, призводить до того, що вид вважається толерантним відповідно до однієї системи, але може бути класифікований як нетерпимий в іншій системі, яка має вищі вимоги до класифікації. Також можливо, що в одному дослідженні використовувався більший набір видів, включаючи більш широкий діапазон допусків, порівняно з меншими наборами видів, досліджуваними іншим дослідженням.

За словами Леушнера (2009), протилежні оцінки толерантності видів також можуть бути викликані досі існуючим нерозумінням фізіологічних процесів у деревах у стресових умовах. Крім того, результати досліджень, які використовують штучний експериментальний дизайн або лабораторії, часто не можуть бути перенесені безпосередньо на відкритий ландшафт або міську зелену зону. Крім того, відмінності у відповідях між молодими і старими особинами одного виду ускладнюють передачу результатів досліджень саджанців на дорослі дерева. Крім того, окремі дерева можуть проявляти різну чутливість і допуски відповідно до їх індивідуальної історії. Як і у випадку з *B. pendula*, особини, які з раннього віку пристосовані до посушливих умов, часто краще справляються з посухою, ніж ті, які звикли до більшої кількості води (Roloff 2013a). Тим часом для деяких видів, напр. *F. sylvatica*, було зазначено, що походження різняться за їхньою здатністю переносити стреси навколишнього середовища (Gillner 2012, Seifert 2011, Fotelli et al. 2009, Lenzion & Leuschner 2008). Використання різних походженням розглянуто більш детально в розділі 5.2.

Приклад *A. platanooides* і *A. pseudoplatanus* чітко показує, що різні види в

межах одного роду можуть дуже по-різному реагувати на стрес і можуть розвивати різні рівні толерантності. У той час як *A. platanoides* був класифікований як «помірно толерантний», *A. pseudoplatanus*, з іншого боку, вважався «помірно чутливим» як до посухи, так і до спеки. Відповідно, Climate-Species-Matrix Roloff et al. (2009), який класифікує види відповідно до їх придатності для міських територій в умовах зміни клімату на основі їх посухостійкості, включає різні види з роду *Acer*. Наприклад, *Acer campestre* класифікується як «дуже придатний», тоді як його родич *Acer pseudoplatanus* вважається «непридатним». Отже, слід бути обережними з узагальненими висловлюваннями щодо всього роду. З цієї причини тут була використана лише література, що стосується відповідних видів.

Слід зазначити, що, незважаючи на те, що вид переносить посуху та/або спеку, це не обов'язково є його бажаними умовами. Дерево, яке демонструє найкращу поведінку у вологому ґрунті та при рясних опадах, все ще може переносити стрес від посухи, якщо це необхідно. Ця оцінка зосереджена на стійкості до посухи та спеки, у тому сенсі, що види дерев, класифіковані як толерантні, здатні підтримувати придатність у стресових умовах. Таким чином, вони не обов'язково мають оптимальні умови вирощування в сухих і жарких місцях, але менше, ніж інші види, страждають від стресу. У кращому випадку види, які переносять спеку та посуху, також віддають перевагу цим умовам. Але це не є обов'язковою умовою для класифікації як «помірно толерантний» або «дуже толерантний». Крім того, слід розрізняти здатність просто пережити стрес від посухи та процвітати, рости та розмножуватися в стресових умовах. Оскільки естетика особливо важлива в міських районах, візуальні ознаки пошкодження та осипання листя гілок також небажані як обмеження росту або цвітіння (Roloff 2013a, Wittig 2008, Konijnendijk et al. 2005).

4.4. Сучасний стан досліджень

Огляд літератури показує, що кількість доступних досліджень суттєво відрізняється для окремих видів дерев. Зазвичай використовувані лісові види, що представляють більший економічний інтерес, такі як *F. sylvatica* і *Q. robur*, частіше вивчаються на предмет їх взаємозв'язку між кліматом і зростанням і можливих реакцій на зміну умов навколишнього середовища, ніж види, що мають менший економічний інтерес. Багато досліджень зосереджені на лісовому господарстві, оскільки інтерес до широко поширених лісових дерев вищий, ніж до декоративних порід з деревиною нижчої якості. Найпоширенішими родами лісових дерев у Німеччині є бук (*Fagus*), дуб (*Quercus*), ялина (*Picea*) та сосна (*Pinus*) (наприклад, NW-FVA 2014 і BMELV 2012). Деякі види, такі як *A. hippocastanum*, не представляють економічного інтересу з лісокультурної точки зору. Тим не менш, деякі з них зазвичай використовуються в міських районах і тому представляють інтерес для міських планувальників і менеджерів міських зелених насаджень. Відповідні дослідження також зосереджені набагато більше на естетиці дерев та можливих втратах візуальної якості, ніж дослідження з фокусом на лісовому господарстві, де комерційні аспекти, темпи росту дерев та якість деревини мають більшу важливість (Sjöman et al. 2012).

Наразі в лісовому господарстві обговорюються дві основні теми щодо майбутнього розвитку: по-перше, можливі зміни в структурі громад та чисельності видів у лісах помірного поясу через зміну клімату; по-друге, адаптований до клімату перетворення лісів на суміш видів, яка підходить для майбутніх кліматичних умов (Carón et al. 2015, Kölling et al. 2009b). Місцеві органи влади, такі як уряд Баварії, прийняли рішення про плани дій щодо заміни деревних порід, уразливих до майбутніх впливів зміни клімату, на більш адаптовані види. У зв'язку з цим дослідження (наприклад, Kölling et al. 2009b) зосереджені на тому, щоб визначити, які види є найбільш підходящими для регіону, а які можна вважати проблематичними, і тому їх слід уникати в майбутньому.

Результати досліджень, присвячених лісовому господарству, можна

перенести в інші сектори, якщо мати на увазі вихідний контекст. Умови посухи та спеки більш серйозні в міських районах, ніж у лісах, тому дерева також піддаються більш сильному стресу (Roloff 2013a). Gillner (2012) дійшов висновку, що вплив додаткових факторів, що впливають на зростання в міських районах, дуже важко розрізнити. З цієї причини дендрохронологічні дослідження досі зосереджені переважно на лісових деревах та більш природних зонах. Тим не менш, зміна кліматичних умов однаково впливає як на міські дерева, так і на лісові дерева. Деякий брак знань залишається при перенесенні результатів в інший контекст, оскільки неможливо гарантувати, що види, які добре справляються з посухою та спекою в лісовій екосистемі, однаково добре працюють у міській місцевості. З іншого боку, висновки з міських районів також можуть допомогти оцінити майбутню придатність деревних порід для лісового господарства за мінливих кліматичних умов, оскільки міські дерева вже відчувають умови, з якими лісові дерева можуть впоратися в майбутньому (Schmidt 2014).

У Німеччині лише вісім різних родів становлять більшість усіх міських дерев (Bauer 2012). Це може бути причиною зосередження дослідження на певних видах чи родах. *Acer*, *Quercus*, *Fraxinus* і *Aesculus* — чотири роди, окремі види яких включені в цей аналіз, є одними з найчастіше висаджуваних родів. Фактичний видовий склад міської популяції дерев може фактично залежати від кількох факторів, включаючи вартість, доступність та придатність для міських територій, а також менш кількісно вимірювані аспекти, такі як досвід садівників або творчі рішення (Wittig 2008). Дотепер міська популяція дерев у німецьких містах в основному складається з місцевих видів і лише окремих представлених видів, як-от дуже популярний *A. hippocastanum* (Schmidt 2014). Обсяг доступної інформації, звісно, найбільший для видів, які найчастіше використовуються сьогодні, незважаючи на деякі прогалини в знаннях, які також існують для відносно добре вивчених видів. Безумовно, враховуючи зміну клімату, виникає потреба в додатковій інформації про придатність видів у майбутніх умовах.

На додаток до довгострокових досліджень взаємозв'язків зростання клімату, багато досліджень зосереджуються на хвилі екстремальної спеки та періоді посухи в 2003 році або на експериментально змодельованих умовах посухи. Дослідження, проведені протягом 2003 та наступних років, дають хорошу можливість вивчити вплив екстремальних кліматичних умов на дерева, оскільки вони одночасно постраждали від спеки та посухи (Saccione et al. 2009, Friedrichs 2008, Bréda et al. 2006). Тим не менш, слід враховувати, що посуха та теплова хвиля були регіонально різноманітними (Beck 2011). Щоб навести кілька прикладів, Saccione et al. (2009) спостерігали негативний вплив теплової хвилі 2003 р. на виживання сіянців *F. excelsior* та *A. pseudoplatanus*. Подібним чином Czajkowski та співавт. повідомляли про зниження росту *F. sylvatica*, викликане водним стресом, протягом року після посухи. (2005). Крім того, у кількох дослідженнях спостерігалось зменшення листяності лісу та приросту лісових дерев, а також збільшення відмирання лісів у Німеччині в 2003 році та роках після посухи (наприклад, MELUR 2013, MKULNV 2013, NW-FVA 2013a, Burk 2006). З іншого боку, дослідження *B. pendula* показало, що Silber Birch зміг добре впоратися з умовами посухи, регулюючи транспірацію та ефективно витягуючи воду з ґрунту (Gartner et al. 2009). Інші приклади походять із досліджень у міських районах, наприклад звіти про підвищену смертність щойно пересаджених і не поливаних *A. hippocastanum* (Percival & Noviss 2008). Тому Percival & Noviss (2008) рекомендували штучне посилення посухостійкості, особливо під час утворення нових коренів, оскільки недостатньо посухостійкі дерева, потребують додаткового поливу, щоб запобігти такому підвищенню смертності. Такі висновки підкреслюють класифікацію (табл. 9) *F. sylvatica* та *A. hippocastanum* як «помірно чутливих до посухи», а *B. pendula* як «дуже посухостійких».

Встановлення взаємозв'язків між кліматом і зростанням – це метод, який використовується в кількох дослідженнях для визначення впливу кліматичних факторів на ріст і життєздатність окремих видів дерев. Ці дослідження досліджують взаємозв'язок між кліматом і зростанням дерев, беручи до уваги

як внутрішні фактори (наприклад, вік), так і зовнішні фактори (наприклад, кліматичні фактори або методи управління) (Gillner et al. 2014). Взаємозв'язки клімат-зростання залежать від регіону, породи дерев і відповідних місцевих умов (Beck 2011). Gillner та ін. (2014) зазначають, що поодинокі екстремальні явища можуть мати такий же сильний вплив, як і довгострокові зміни середніх кліматичних умов. Лінднер та ін. (2010) навіть припускають, що екстремальні події, такі як тривалі періоди посухи, мають більш драматичні наслідки для дерев, ніж постійні, але невеликі зміни. Тому важливо враховувати мінливість клімату.

Вивчення так званих вказівних років є часто використовуваним методом для визначення взаємозв'язків клімату та зростання. Вказівні роки значного зниження зростання можуть бути викликані різними факторами навколишнього середовища та зовнішніми впливами, такими як кліматичні фактори, а також спалахами шкідників або людськими порушеннями, такими як будівельні роботи в містах (Gillner et al. 2014). Бек (2011) виявив, що негативні вказівні роки у звичайних німецьких лісових породах, таких як дуб і бук, у 1970-х роках були в основному пов'язані з зимовою холодністю. За останні 20 років, натомість, жарке та посушливе літо викликало сповільнення росту. Інші дослідження (наприклад, Scharnweber et al. 2011) змогли встановити зв'язок між річними кліматичними характеристиками (опадів та температура) та ростом дерев. Для *F. sylvatica* та *Q. robur* результати показують, що зростання залежить від доступності води на початку літнього місяця. Крім того, посуха була визначена як ключовий чинник сповільнення зростання.

Окрім наукових досліджень, деякі знання від практиків також доступні, напр. список вуличних дерев GALK (GALK 2015), який включає досвід міських садівників. Як правило, література, як правило, більше зосереджується на наслідках стресу від посухи, ніж на тепловому стресі. Тепловий стрес може безпосередньо впливати на ріст дерев, метаболізм і процеси, але, крім того, може викликати вторинні ефекти (див. також розділи

2.3.2 і 2.3.3). Якщо температура підвищується, а кількість опадів залишається постійною, стрес від посухи може бути викликаний або посилений через збільшення випаровування та подальшого зниження доступності води. Теплолюбні дерева процвітають при більш високій температурі, але, якщо вони чутливі до посухи, вони можуть насправді постраждати в більш теплих і сухих умовах (Ryan 2011). Тому, зосередженість дослідження на стресі від посухи, безумовно, виправдана, оскільки стрес від посухи також може бути пов'язаний із спекою. Тим не менш, не слід ігнорувати прямі наслідки теплового стресу і потребують подальшого дослідження деяких видів. Нарешті, для *A. glutinosa*, *P. nigra* та *S. alba* не було можливого висновку щодо термопереносимості. Незважаючи на те, що окремі дослідження повідомляли про стійкість до спеки решти видів, оцінка мала базуватися на меншій кількості звітів порівняно з оцінкою посухостійкості через обмежену доступність літератури.

5. АНАЛІЗ ТА ОБГОВОРЕННЯ

5.1. Рекомендації щодо вибору міських порід дерев

Важливість адекватного відбору видів була визнана не лише для міської рослинності, а й у контексті лісового господарства та управління лісовими екосистемами (Reif et al. 2010). Для відбору лісових дерев BWV (2009) рекомендує такі параметри для оцінки: річна сума опадів, середньорічна температура, тип ґрунту та вологість ґрунту. Натомість, за даними Burk (2006), лісові насадження сильніше залежать від кількості опадів протягом вегетаційного періоду, ніж від річної кількості опадів. Таким чином, замість річних опадів кращим показником є опади протягом вегетаційного періоду. Загалом, селекція в лісовому господарстві в основному зосереджується на швидкозростаючих генотипах з добре використаною деревиною, яка демонструє високу стійкість до хвороб і шкідників (Sjöman et al. 2012).

Незважаючи на це, оцінка придатності деревних порід у міських районах ускладнена через змінені природно-кліматичні та екологічні умови. Це означає, що критерії відбору, рекомендовані для лісових дерев, недостатні для

міських дерев і необхідно враховувати додаткові фактори. Фізична стабільність, безпека дорожнього руху та довговічність дерев, що визначаються стійкістю до стресу, мають першочергове значення. Крім того, масове розмноження, простота вирощування, а також дизайнерські якості є також важливими в міських районах (Duhme & Pauleit 2000).

Практичні рекомендації щодо вибору дерев у міських районах надані, наприклад, Bassuk et al. (2009), GALK (2008), Gilman & Sadowski (2007) та Pauleit (2003). Іншою літературою, рекомендованою для консультацій, є Climate-Species-Matrix від Roloff et al. (2009) щодо придатності майбутніх порід дерев у міських районах відповідно до посухостійкості та зимостійкості, а також списку GALK (GALK 2015), який фокусується на вуличних деревах. Відносно нова база даних «CITREE» з'явилася в результаті дослідницького проекту в ТУ Дрездена та забезпечує підтримку прийняття рішень щодо вибору міських порід дерев (TU Dresden 2016). Крім того, деякі загальні зауваження щодо екологічних вимог деяких з вибраних видів можна знайти в Ellenberg & Leuschner (2010), тоді як Roloff (2013a) підсумовує придатність кількох видів спеціально для міських районів. Нарешті, для Великобританії база даних «Правильне дерево для клімату, що змінюється» (UK Forestry Commission 2015) надає інформацію та рекомендації щодо вибору відповідних видів, які адаптовані до очікуваних змін кліматичних умов.

Залежно від місця розташування на практиці може бути бажаним вищий рівень однорідності дерев, особливо для вуличних дерев. Використання специфічних клонів і зменшення варіації висаджених сортів може задовольнити цю потребу. Отже, комерційні інтереси можуть суперечити екологічним інтересам створення більшої різноманітності в міських зелених насадженнях. Sæbø та ін. (2005) тому пропонують вибирати нетрадиційні види для підвищення рівня біорізноманіття. Крім того, під час вибору слід враховувати форму та розміри крони, швидкість росту та потенційну тривалість життя. Більше різноманітності особливо бажано для парків, які

отримують переваги від більшої візуальної різноманітності дерев різного віку, структури та розміру. Більша різноманітність дерев робить усі міські дерева більш стійкими до шкідників, ніж монокультури (MKULNV 2013, GALK 2011). З цієї причини посадка міських дерев за формулою 10-20-30 (максимум 10 % окремої породи дерев, максимум 20 % роду дерев, максимум 30 % родини дерев) пропонується зменшити. схильний до зараження шкідниками (Li et al. 2011). Однак на практиці дерева часто вибирають відповідно до наявності, традицій, садівничого досвіду, а також тенденцій, що спричиняє низьку різноманітність у містах Північної Європи (Sjöman et al. 2012). У середньому лише вісім пологів дерев становлять більшість дерев у місті, тому кількість різних видів дерев у міських районах має бути збільшена (Duhme & Pauleit 2000).

5.2. Місцеві та немісцеві види та нові походження

Сьогодні неможливо дати точні прогнози майбутнього клімату, оскільки всі кліматичні прогнози містять певні діапазони можливого майбутнього розвитку подій. З цієї причини велика генетична різноманітність і велика фенотипічна пластичність є бажаними ознаками міських дерев, щоб вони могли впоратися з низкою можливих змін. Чим більше їхня здатність фізіологічно пристосовуватися до змін або стресових умов, тим краще (MKULNV 2013, Aspelmeier & Leuschner 2005). В ідеалі дерева можуть впоратися з широким спектром різних кліматичних умов.

Оскільки на різні види по-різному впливають однакові умови посухи, вибір повинен зосередитися на тих видах, які найкраще пристосовані та демонструють найвищу толерантність до посухи та спеки. Види, що походять із більш посушливого клімату, можуть не страждати від посухи, тоді як види з більш вологого клімату вже зазнають стресу від посухи за тих же умов (Ryan 2011). Той факт, що теоретично найбільш підходящими видами не обов'язково є місцеві види, породжує іншу дискусію щодо використання місцевих і немісцевих видів. GALK (2011) розрізняє процес відбору для більш природних ландшафтів або сільської місцевості, з одного боку, і для міських районів, з іншого боку. Хоча місцеві види віддають перевагу для незабудованих територій з міркувань збереження природи, сорти та інші види з напівпосушливих регіонів можуть представляти альтернативу менш стійким до посухи місцевим деревам у містах. Ці дерева можуть бути краще пристосовані до стресових міських умов і підвищують бажаний рівень різноманітності (MKULNV 2013, GALK 2011).

Pauleit (2003) підтримує тестування нових, нерідких порід дерев, щоб знайти відповідні альтернативи для майбутнього клімату. Хемері (2007) також пропонує висаджувати не місцеві види як відповідну альтернативу, якщо умови ділянки відповідають вимогам дерев. Крім того, він не радить використовувати дерева з вузьким генетичним діапазоном. Так само Reif et al. (2010) стверджують, що немісцеві види можуть відповідати екологічним

умовам місця. Тим не менш, автори нагадують, що використання немісцевих видів вважається критичним серед експертів з охорони природи. Серед природоохоронної спільноти використання місцевих видів часто є центральним критерієм. Тому на практиці альтернативи посадки з інших регіонів можуть не знайти визнання серед місцевої громади та охоронців природи. Маючи це на увазі, Roloff & Grundmann (2008a) пропонують використовувати немісцеві види лише для важких місць, де місцеві види більше не є варіантом. У будь-якому випадку перед посадкою нових порід у великих масштабах настійно рекомендується провести ретельне тестування нових видів дерев.

Дерева не тільки повинні бути стійкими до посухи і спеки, але також повинні протистояти іншим стресам, що виникають протягом року. Вони можуть бути менш вираженими або відсутні в їх первісному середовищі існування, наприклад, заморозки або пізні заморозки. Roloff & Grundmann (2008b) рекомендують спостерігати за впливом нових видів дерев на нове середовище проживання, напр. про ґрунт, флору і фауну. За даними Sjöman et al. (2012), необхідні додаткові знання та більш великий досвід щодо адаптації порід дерев.

Замість використання абсолютно нових, немісцевих видів, іншим варіантом є використання видів різного походження, які також є рідними для Німеччини. Багато видів дерев, які широко поширені в кліматично диференційованих регіонах, з часом розвинулися. Вони адаптовані до відповідних місцевих умов, яким вони піддаються. Незважаючи на те, що вони належать до однієї породи дерев, вони мають різні генетично визначені характеристики (Reif et al. 2010). Таким чином, залежно від походження, походження по-різному добре пристосовані до стресів. Походження в більш сухих регіонах, наприклад, краще пристосовані до посухи, ніж походження з більш вологих регіонів. Таким чином, подібні кліматичні умови можуть

викликати різні рівні стресу в різних походженнях, як показало дослідження *F. sylvatica* під час літньої посухи 2003 року (Fotelli et al. 2009).

Високий ступінь різного походження особливо зафіксовано для двох широко поширених лісових дерев *F. sylvatica* (Seifert 2011, Lendzion & Leuschner 2008, Peuke & Rennerberg 2004, García-Plazaola & Becerril 2000) і *Q. robur* (Arend 201 et al.)., Scharnweber et al. 2011). Можливо, альтернативою місцевим походженням в умовах зміни клімату можуть служити походження з теплих і сухих регіонів, які виявилися більш посухостійкими (MKULNV 2013). Broadmeadow та ін. (2005) пропонує вибирати походження з походження, де поточні кліматичні умови нагадують прогнозовані майбутні умови цільової території. Крім того, GALK (2011) рекомендує використовувати різні походження, щоб досягти більш високого генетичного різноманіття. Тим не менш, деякі невизначеності залишаються, як-от сприйняття нерідного походження природоохоронцями та толерантність до різних стресів, які менш виражені в походженнях (наприклад, мороз) (Reif et al. 2010).

На відміну від природних зон, посадки в міських районах часто містять різноманітні сорти, які оптимізовані відповідно до вимог, що пред'являються до дерева. Таким чином, на додаток до природного походження, вирощування дає потенціал для створення сортів дерев, придатних для майбутніх умов, наприклад. шляхом просування більш стійких до спеки та посухи сортів. Високий ступінь генетичної мінливості та потенціал створення гібридів є перевагами в цьому контексті (Bauer 2012, Roloff & Bonn 2008). Крім того, оскільки масове виробництво насіння місцевих дерев може бути складним, на практиці можуть виникнути проблеми з доступністю місцевих сортів (GALK 2011).

5.3. Оцінка придатності видів з біокліматичними оболонками

Поширеним підходом для визначення придатності видів у майбутньому, особливо в дослідженнях лісового господарства, є використання моделювання біокліматичної оболонки. Певною мірою різні моделі біокліматичної оболонки, також відомі як моделі поширення видів або моделі екологічної ніші, відрізняються за своєю методологією (Araújo & Peterson 2012, Pearson & Dawson 2003). Багато моделей біокліматичної оболонки дотримуються теорії екологічної ніші та ґрунтуються на припущенні, що кліматичні умови – серед інших факторів – головним чином визначають природний ареал поширення виду. Отже, вважають, що зміни кліматичних умов викликають географічний зсув у розподілі видів (Araújo & Peterson 2012, Pearson & Dawson 2003). У той час як узгоджуючи поточний потенційний розподіл видів з відповідними кліматичними умовами в населених районах, виводяться біокліматичні оболонки (тобто кліматичні ніші) (Vasconcelos et al. 2013, Pearson & Dawson 2003). Щоб оцінити майбутню придатність виду та можливі зрушення в потенційному поширенні видів, ці оболонки потім поєднуються з прогнозованими кліматичними змінами в регіонах, що представляють інтерес (Vasconcelos et al. 2013).

Дослідження Vasconcelos et al. (2013) створює біокліматичні оболонки для найважливіших порід лісових дерев у Рейнланд-Пфальц, беручи до уваги середньорічну температуру, вегетаційний період і літні температури, а також річні опади, опади протягом вегетаційного сезону та влітку. Аналізуючи території, де існують види дерев та відповідну частоту їх зустрічальності, автори оцінюють кліматичні комфортні умови для кожної породи. Таким чином, для кожної породи створюється кліматична матриця, яка відображає діапазон температур і опадів, а також придатність породи дерев у різних умовах. Результати показують загальне зниження придатності для всіх спостережуваних родів (бук, дуб та ялина) та регіонів Рейнланд-Пфальца. Проте регіональні відмінності мають місце, напр. сильніші втрати очікуються на схилах пагорбів у долинах річок або низовинах, тоді як умови можуть

стати більш сприятливими на більших висотах. Порівняння видів показує, що найбільший ризик непридатності в майбутньому очікується для ялини. Нижчий, але все ж значний ризик очікується для бука, тоді як для дуба прогножуються лише незначні зміни. Ці висновки загалом відповідають посухостійкості, яка передбачається в цій дисертації для «помірно чутливого» бука європейського та «помірно толерантного» звичайного дуба. Цей підхід дає хорошу першу вказівку на загальні кліматичні вимоги виду на основі його великомасштабного поширення.

Як зазначають Falk & Hempelmann (2013), змінні клімату в першу чергу визначають поширення видів у континентальному масштабі, тоді як місцевість і ґрунт набувають все більшого впливу на менших масштабах. Загалом підхід біокліматичної оболонки є досить корисним для лісового господарства та оцінки загальної придатності дерева до певного клімату замість надання інформації про місцеву придатність. Наприклад, може бути корисно оцінити загальну придатність нових походження або немісцевих видів до великомасштабного клімату регіону. Оскільки цей підхід працює з діапазонами комфорту кліматичних параметрів, він також враховує протилежні крайності певних факторів, напр. високі та низькі температури. Біокліматичні оболонки можуть, наприклад, також допомагати оцінити придатність до особливо низьких температур або морозів, що важливо для немісцевих, посухостійких видів, оскільки вони також повинні впоратися з усіма іншими переважаючими екологічними стресами, які можуть відрізнятися від стресів у їх природному ареалі поширення. Проте врешті-решт потрібен додатковий аналіз, щоб оцінити придатність виду для міських районів.

Інше дослідження Kölling (2007) представляє кліматичні оболонки для 27 видів лісових дерев, щоб оцінити їх майбутню придатність для лісового господарства Німеччини. Автор використовує двовимірні частотні розподіли

річної суми опадів і середньорічних температур для порівняння поточних і прогнозованих майбутніх кліматичних умов з вимогами видів відповідно до їх поточного потенційного розподілу. Передбачається, що придатність збільшується з кращою відповідністю вимог і існуючим поточним або майбутнім умовам. Такий підхід дає можливість порівняти потреби видів, що впливають із їхнього природного поширення, з кліматичними умовами в Німеччині. Таким чином, він працює з тими ж припущеннями, що й раніше обговорений підхід Васконселос та ін. (2013). Проте, оскільки дослідження працює з усередненими за рік кліматичними даними, цей підхід може не враховувати потенційний тимчасовий зсув опадів з літа на зиму. Регіональні кліматичні дані пропонують додаткову інформацію для уточнення таких кліматичних конвертів.

З іншого боку, різні дослідження критикують досить статичний підхід моделей біокліматичної оболонки, оскільки інші фактори впливу, такі як біотичні взаємодії, умови ґрунту, екстремальні місця, еволюційні зміни, здатність до розповсюдження та адаптаційний потенціал порід дерев до більш екстремальних умов, не враховуються. (Araújo & Peterson 2012, Suttmöller et al. 2008, Pearson & Dawson 2003). Крім того, оригінальний ландшафт Європи був змінений багатьма способами, тому поточне поширення виду не дорівнює його природному поширенню. Причини включають, напр. заміщення населеними пунктами, вирубка дерев, штучні насадження в інших місцях. Тому існує різниця між потенційним і фактичним розподілом, тобто між фундаментальною та реалізованою нішею, через різні некліматичні обмеження. З цієї причини існує ризик зробити неправильні висновки, зіставляючи поточне поширення виду з відповідними кліматичними умовами (Falk & Hempelmann 2013, Araújo & Peterson 2012, Pearson & Dawson 2003). Іншою причиною занепокоєння є якість даних, оскільки неточні або неповні дані про присутність видів можуть спричинити хибну картину біокліматичної оболонки (Araújo & Peterson 2012).

Незважаючи на всю критику, Pearson & Dawson (2003) вважають моделі біокліматичної оболонки цінними для першої оцінки відповідних територій під час зміни клімату, за умови врахування згаданих обмежень. Крім того, автори наголошують на важливості адекватного просторового масштабу. У континентальному масштабі основний вплив має клімат. Тому декілька моделей були досить успішними для моделювання поширення вищих видів рослин. Проте результати були з різною точністю для різних видів. Більше того, більш дрібні деталі розподілів часто не враховувалися. У локальному масштабі інші фактори, напр. тип ґрунту та біотичні взаємодії, отримують вплив і можуть стати більш домінуючими порівняно з кліматом (Pearson & Dawson 2003). Це особливо важливо в контексті міських дерев, оскільки міські мікрокліматичні умови можуть значно відрізнятися від умов навколишнього середовища.

Крім того, передача інформації з більшого в менший масштаб є складною проблемою, оскільки це тягне за собою додаткові джерела помилок. Можливо, вид підходить відповідно до масштабних кліматичних умов, але місцеві фактори або екстремальні місця заважають хорошему росту. Додаткова інформація, яка наразі не надається біокліматичними оболонками, необхідна в контексті міської зелені для вирішення складних міських умов та додаткових стресів. Тому потрібні комфортні умови для виду, характерного для міського середовища, в тому числі, напр. діапазон допусків до забруднення, солі або більш екстремальних кліматичних умов. Такий підхід, однак, потребує іншої методології, оскільки необхідна інформація не може бути вилучена з великомасштабних розподілів однаковою чиною. Підводячи підсумок, виявляється, що моделі біокліматичної оболонки можуть дати гарну першу вказівку щодо придатності видів у більшому регіоні. Однак вони не можуть дати достовірну оцінку для сильно варіабельних міських територій через додатковий вплив багатьох місцевих факторів, які недостатньо

враховані в багатьох моделях. Біокліматичні моделі оболонки скоріше мають можливість оцінити придатність відповідно до більш масштабних кліматичних умов.

5.4. Рекомендації щодо досягнення найкращих переваг для міських територій

Оскільки дерева садять не лише на кілька років, але вони призначені для того, щоб процвітати та приносити свої переваги протягом кількох десятиліть, для досягнення максимально можливої вигоди необхідно враховувати ряд міркувань. Перш за все, потрібно вибрати відповідні види відповідно до поточних і очікуваних майбутніх кліматичних умов. По-друге, окреме дерево має відповідати конкретним місцевим умовам ділянки. Тому комплексна оцінка ділянки в ідеалі передуює посадці дерева (Sjöman et al. 2012, Bassuk et al. 2009, Gilman & Sadowski 2007). Рекомендується також покращити умови на ділянці для успішного виведення дерев (Duhme & Pauleit 2000). Підхід до врахування характеристик дерев, а також умов ділянок називається «правильним деревом у правильному місці» (Benedikz et al. 2005). Це особливо важливо, щоб уникнути більших витрат на додаткове обслуговування або необхідну заміну пошкоджених або мертвих дерев пізніше (Doick & Hutchings 2013, Bassuk et al. 2009, Gilman & Sadowski 2007). Інші фактори включають якість дерев, відповідну посадку та управління, створення та збереження відповідного середовища (наприклад, відсутність герметизації поверхонь пізніше), а також витрати на придбання та управління (Danielzik + Leuchter Landschaftsarchitekten 2012, Benedikz et al. 2005, Sæbø et al. 2005).

Ще один важливий момент – міські зелені насадження та вуличні дерева потребують регулярного догляду. Адекватне садівництво необхідне для збереження здоров'я та естетичної цінності, а також для забезпечення безпеки в міському середовищі, оскільки падіння вітру та пошкодження через снігове навантаження становлять небезпеку для мешканців (Siewniak &

Kusche 2009). Погану якість ґрунту та несприятливі умови ділянки можна частково компенсувати використанням відповідного рослинного субстрату. Крім того, поширення мікоризних грибів може збільшити поглинання води та поживних речовин (Böll et al. 2014). Percival & Noviss (2008) зазначають, що дерева, вирощені в контейнерах, особливо вразливі до стресу від посухи протягом першого місяця після пересадки їх на кінцеве місце. Тому стрес від посухи особливо часто спостерігається у молодих, щойно посаджених міських дерев. Автори пропонують підвищення посухостійкості, напр. шляхом застосування хімічних речовин. Як правило, слід приділяти увагу достатньому поливу, принаймні, протягом перших місяців після посадки, щоб забезпечити успішне укорочення дерев. Bassuk та ін. (2009) так само рекомендують зрошувати нещодавно посаджені дерева протягом перших років, щоб гарантувати пристосування до навколишнього середовища.

Konijnendijk та ін. (2005) опублікував довідник про міські ліси та дерева, який надає більш детальну інформацію для практиків, напр. про планування та дизайн зелених насаджень, детальну інформацію про вибір рослин, методи управління, а також тематичні дослідження з різних міст. У Німеччині технічні та юридичні вимоги щодо догляду за деревами також викладені в різних офіційних нормативних актах (Siewniak & Kusche 2009). Крім того, короткий практичний посібник з оцінки місцевості та вибору видів було опубліковано Gilman & Sadowski (2007), а більш загальний практичний посібник щодо міського клімату та варіантів адаптації для практиків від MUNVL (2010).

5.5. Обговорення питань дослідження та перспективи на майбутнє

Щоб завершити аналіз та обговорення цього дослідження, чотири дослідницькі питання, порушені у вступі, будуть обговорені нижче.

Які наслідки зміни клімату прогнозуються для вибраних регіонів Німеччини на 2050-ті роки (2036-2065 pp.)?

Ансамбльні прогнози EURO-CORDEX були оцінені для трьох регіонів

(Східний, Північно-Західний та Південно-Західний), які ілюструють різні кліматичні умови Німеччини. У центрі уваги були частота та тривалість хвиль спеки та засушливих періодів у 2050-х роках. Збільшення кількості спекотних днів і спеки протягом вегетаційного періоду прогнозується для всіх регіонів. Найбільше збільшення кількості спекотних днів очікується на південному заході, регіоні, де, за даними спостережень E-OBS, вже сьогодні спостерігається більше спекотних днів, ніж в інших регіонах. Крім того, на південному заході прогнозується збільшення кількості та тривалості посушливих періодів. Прогнозується, що на Сході буде спостерігатися збільшення суми опадів влітку, але чіткого сигналу щодо кількості та тривалості засухи не існує, тобто не надається інформація про тимчасовий розподіл опадів. Прогнози досить неоднозначні з частково широким діапазоном можливого розвитку деяких з досліджуваних кліматичних індексів. Не видно чіткої тенденції щодо опадів, посушливих періодів та тривалості хвиль спеки протягом вегетаційного періоду в одному чи кількох регіонах. Незважаючи на те, що для деяких індексів немає чітких сигналів, прогнозоване збільшення кількості сухих спекотних днів і хвиль спеки потенційно може призвести до більш сухих умов у всіх регіонах через збільшення випаровування при вищих температурах.

Причини відсутності узгодженості ансамблю для деяких індексів включають складність моделювання опадів, на які впливають численні процеси в різних масштабах. Крім того, під час моделювання клімату необхідно зробити певні припущення, або через неповне розуміння природних процесів, непередбачуваність соціально-економічного розвитку, або через те, що моделі мають спрощувати реальність. Крім того, неоднозначні результати можна пояснити вибором місця, оскільки Німеччина належить до перехідної зони між регіонами з більш чіткими тенденціями в Північній та Південній Європі. Хоча прогнози більшою мірою узгоджувалися зі змінами в Північній та Південній Європі, для Німеччини існують більша

пропускна здатність та протилежні прогнози, особливо щодо індексів на основі опадів.

У будь-якому випадку важливо зазначити, що відсутність згоди учасників ансамблю щодо тенденції для деяких індексів не означає, що змін не буде. Навпаки, для деяких індексів майбутній розвиток залишався незрозумілим і однаково можливі як більші зміни в будь-якому напрямку, так і постійний розвиток. Це призводить до необхідності подальшого розвитку регіональних кліматичних моделей, з одного боку, а також до готовності до більшого діапазону можливих змін, з іншого боку. Перше вирішується шляхом постійного розвитку регіональних кліматичних моделей. Моделі постійно вдосконалюються, а ансамбль розширюється (ініціатива EURO-CORDEX 2015). Останнє потрібно вирішувати шляхом адекватної адаптації до зміни клімату, зосереджуючись на діапазоні можливих змін замість того, щоб зосередитися на одній альтернативі або навіть утримуватися від дій взагалі.

У подальшому дослідженні слід враховувати одночасне виникнення засушливих періодів і хвиль тепла. Крім того, додаткові індекси, які зосереджені більш конкретно на фактичній доступності води, можуть дати додаткове уявлення про майбутнє становище міських дерев. З іншого боку, як показав огляд літератури, існує не так багато кількісних порогів для визначення вимог до видів дерев (наприклад, мінімальна кількість опадів, необхідних протягом вегетаційного періоду). Оскільки багато місцевих умов, включаючи фактори ґрунту, а також індивідуальна історія дерева впливають на життєздатність дерева, такі загальні значення можна знайти лише рідко. Більше того, вони більш релевантні для широкомасштабного поширення видів і менш релевантні для придатності для конкретного місця, якщо вони не доповнені додатковою інформацією. У менших масштабах багато місцевих впливів вступають у гру і набувають все більшого значення. Ця складність

зберігається, навіть якщо додаткові індекси були розраховані з даних EURO-CORDEX. Тому не можна очікувати, що результат цієї роботи був би принципово іншим, якби були обрані інші індекси.

Яким чином на десять відібраних видів дерев загалом вплинуть посушливі періоди та хвилі спеки, і що означають ці результати щодо впливу зміни клімату в регіонах, що досліджуються?

Після обговорення прогнозованих впливів зміни клімату, десять видів широколистяних дерев були відібрані на основі огляду рослинності в міському парку у Фрізойте, Нижня Саксонія, які потім були класифіковані відповідно до їх стійкості до спеки та посухи. Існують різні системи класифікації з різною кількістю класів для посухостійкості або пов'язаних параметрів. Більшість публікацій, як правило, зосереджуються на відносних твердженнях замість того, щоб називати конкретні пороги вимог до видів, напр. на необхідну мінімальну кількість опадів (див. табл. 7). Існуючі системи класифікації були порівняні та об'єднані (див. табл. 7, табл. 8). табл. 9 надає огляд підсумкової оцінки стійкості десяти видів до спеки та посухи. Аналіз цієї тези показав, що в даний час доступно набагато менше інформації щодо стійкості видів до тепла, ніж щодо їх стійкості до посухи. Тому оцінка стійкості до спеки базується на меншій кількості досліджень порівняно з аналізом посухостійкості. Крім того, рівень деталізації інформації про обидва допуски сильно різниться між різними видами. Прогалини в знаннях існують особливо для менш інтенсивно вивчених з меншою економічною цінністю.

Після ретельного розгляду стало очевидним, що просте порівняння прогнозованих кліматичних умов і допусків деревних видів не може привести до глибокого висновку про майбутню придатність виду. Через високу мінливість прогнозів, що супроводжується гнучким, специфічним для сайту поведінкою дерев, просте зіставлення обох даних наразі неможливе. Враховуючи велику кількість локальних впливів у межах міста та

різноманітність факторів, які визначають вплив факторів стресу (наприклад, час і тривалість спеки чи посухи, схильність тощо), також здається малоімовірним, що загальна оцінка майбутньої придатності стане набагато легше в майбутньому. Навіть якщо пропускна здатність прогнозованих змін була меншою, а тенденції були більш чіткими для всіх індексів, місцеві фактори часто замінюють регіональну ситуацію, і їх потрібно враховувати так само. Натомість більш загальна оцінка посухостійкості та стійкості до спеки вибраних порід пропонує перший крок до прийняття рішення у виборі порід дерев. Оскільки результати ансамблю є неоднозначними для деяких індексів, зокрема для розвитку сухості, необхідна адаптація до діапазону змін. Відповідно слід підбирати дерева.

Тим не менш, широкі розбіжності в прогнозованих змінах, відсутність знань про зміну клімату або про придатність видів не повинні перешкоджати будь-яким діям. Незважаючи на те, що наразі неможливо дати певні рекомендації за чи проти певних дерев у трьох регіонах прикладного дослідження, загальні відмінності в стійкості до посухи та спеки можна визначити, за деякими винятками (див. розділ 4), і їх слід враховувати при виборі деревних порід для міських області. Тому доцільно віддавати перевагу «дуже толерантним» і «помірно толерантним» породам дерев.

Зосереджуючись на підході без жалю, тобто вибираючи переважно посухостійкі та спекотні види дерев для міських територій, заходи адаптації можуть бути корисними вже сьогодні та знизити ризик утворення високочутливих міських зелених насаджень у майбутньому. Оскільки міська зелень надає місту та його жителям численні переваги, посадка відповідних міських дерев має негайний позитивний ефект – безпрограшна ситуація. Оскільки дерева мають дуже довгий термін життя за хороших умов зростання, сьогоднішні рішення слід приймати обережно. Вони впливають на відповідні зелені насадження протягом кількох десятиліть, і слід уникати

дорогих замін недбало висаджених непридатних видів. У кращому випадку дерева можуть впоратися з усім діапазоном прогнозованих кліматичних умов, тим самим підвищуючи ймовірність виживання в майбутніх кліматичних умовах. Щоб включити, зокрема, ці прогнози щодо більш сухих і теплих умов, доцільно зосередитися на «дуже толерантних» або «помірно толерантних» видах. Що стосується розвитку міст, рекомендується підтримувати впровадження за допомогою довгострокового моніторингу.

Проте роль даних регіонального моделювання клімату не слід недооцінювати, хоча щодо деяких показників вона все ще страждає від відсутності згоди учасників ансамблю щодо тенденції. Крім того, важливо вибрати змодельовані індекси відповідно до питання дослідження. Наприклад, річні значення опадів часто менш важливі для росту дерев, ніж опади протягом вегетаційного періоду або навіть протягом окремих місяців (van der Werf et al. 2007, Burk 2006). Відповідно, використані тут індекси відносяться до вегетаційного періоду (травень–вересень). Більше того, лише сума опадів – будь то річна, сезонна чи місячна – не визначає наявності води. Фактори ґрунту та випаровування впливають на кількість води, яка нарешті доступна для дерева. Крім того, сума опадів не враховує різні тимчасові розподіли опадів. Таку ж суму можуть отримати регулярні, помірні опади або кілька сильних опадів. Різні місцеві фактори визначають, чи зможе дерево впоратися зі стресом навколишнього середовища чи ні, і природні умови так чи інакше змінюються в міських районах. Тому визначення абсолютних порогових значень, таких як мінімальна кількість опадів, є сумнівним. Натомість, видається, більш багатообіцяючим зосередитися на якісній оцінці допусків дерева, які є якомога комплекснішими. Якісна інформація може допомогти знайти відповідні види, навіть якщо існують певні прогалини в знаннях і не можна вказати порогові значення.

Критично важливим моментом для функціональної адаптації є передача

наукових знань у практику. Хоча декілька керівних принципів та рекомендацій уже існує, виявляється, що ця область також може потребувати подальшого вдосконалення або покращеного синтезу інформації. Терміново необхідні комплексні концепції стійких міських насаджень дерев, подальші знання про придатність конкретних видів та стандарти якості дерев. Більше того, за словами Pauleit (2003), фінансування міських насаджень дерев часто обмежене, а недоліки кваліфікованого персоналу з необхідними знаннями можуть ускладнити стале впровадження та управління міськими зеленими насадженнями. Для реалізації цієї мети важлива співпраця між урбаністами, ландшафтними архітекторами, біологами, експертами з адаптації до клімату та інженерами-будівельниками протягом усього процесу планування та реалізації. Кліматичні служби, такі як Центр кліматичного обслуговування в Німеччині (GERICS), можуть надати спеціалістів експертів щодо прогнозованих впливів зміни клімату та можливих варіантів адаптації з урахуванням конкретного дослідження. Вони відіграють особливу важливу роль у наданні досвіду адаптації, побудові мереж, консолідації та трансляції наукових знань, а також у наданні порад щодо конкретних ситуацій.

Погляд на майбутнє: в умовах зміни клімату, чи є потреба замінити всі популярні породи дерев, які зараз характеризують наше місто?

Дерева, як важлива частина міського ландшафту, можуть значно підвищити якість життя мешканців, покращуючи мікрокліматичні умови, покращуючи біорізноманіття міст, забезпечуючи декоративну цінність і тінь. Вони також є надійним заходом для адаптації до впливу зміни клімату. Проте ці переваги сильно залежать від здоров'я дерев, якому в майбутньому може загрожувати зміна клімату та очікуване збільшення стресу від спеки та посухи влітку. Стійкість до посухи та спеки деревних порід у міських районах набуває все більшого значення під впливом зміни клімату (Leuzinger et al. 2010). Як видно з різних тематичних досліджень, деякі з досліджуваних

видів чутливі до посухи та/або спеки, що може зробити їх непридатними для майбутніх умов.

Аналіз кліматичних прогнозів і допусків деревних порід» показав, що наразі немає негайної потреби в заміні всіх добре відомих і популярних порід дерев. Принаймні деякі з них були класифіковані як «помірно толерантні» або навіть «дуже толерантні» до спеки та посухи. Тому можна припустити, що вони також витримують потенційно зростаючі навантаження в найближчому майбутньому. Проте, як показали контрприклад, інші види можуть стати непридатними в майбутньому або зможуть добре процвітати лише за умови вжиття додаткових заходів (наприклад, зрошення). Однак такі додаткові заходи небажані через грошові обмеження, більші зусилля та можливість того, що заходи можуть навіть не протидіяти всім негативним стресам. Замість цього слід зосередитися на видах, які вимагають лише мінімального догляду або в ідеалі можуть навіть добре впоратися самостійно, наприклад, від обрізки. Таким чином, щоб забезпечити успіх посадки, важливо враховувати місцеві умови. Використання немісцевих видів або походження широко обговорюється в дослідженнях. Цілком можливо, що нові види додадуть до існуючих і тим самим змінять поточний міський пейзаж у майбутньому. Рекомендується уважно врахувати толерантність до інших стресів (наприклад, мороз), занепокоєння природоохоронців, а також загальну придатність для міського контексту, перш ніж переносити нові види у великих масштабах.

6. ВИСНОВОК

Однією з цілей цієї дипломної роботи є аналіз очікуваних змін, що стосуються хвиль спеки та посушливих періодів у трьох регіонах Німеччини в 2050-х роках з використанням регіональних кліматичних прогнозів ансамблю EURO-CORDEX. Якщо збільшення кількості спекотних днів і хвиль спеки протягом вегетаційного періоду прогнозується для всіх регіонів, то для інших досліджуваних кліматичних індексів прогнози досить

неоднозначні. Тому чіткої тенденції щодо опадів, посушливих періодів та тривалості хвиль спеки протягом вегетаційного періоду не видно. Однією з можливих причин неоднозначних результатів є розташування Німеччини в перехідній зоні між Північною та Південною Європою, для якої прогнозується протилежний розвиток подій.

Проте, прогнозована смуга пропускання кліматичних змін свідчить про необхідність продумати варіанти адаптації, щоб уникнути небажаних пошкоджень дерев та збільшення витрат на утримання. На основі огляду літератури було оцінено загальну стійкість до посухи та спеки для десяти вибраних порід дерев. Види були класифіковані відповідно до посухостійкості або чутливості відповідно до загальної оцінки з використанням чотирьох класів «дуже толерантний» (*B. pendula*), «помірно толерантний» (*A. platanoides*, *F. excelsior*, *Q. robur*), «помірно чутливі» (*A. hippocastanum*, *A. pseudoplatanus*, *F. sylvatica*) і «дуже чутливі» (*A. glutinosa*, *P. nigra*, *S. alba*). Що стосується теплового стресу, то ця сама класифікація була складена з такими результатами: «дуже толерантний» (*B. pendula*, *F. excelsior*), «помірно толерантний» (*A. hippocastanum*, *A. platanoides*, *Q. robur*) і «помірно чутливий» (*A. pseudoplatanus*, *F. sylvatica*). Через недостатню інформацію оцінка термотолерантності для *A. glutinosa*, *P. nigra* та *S. alba* була неможлива. Як правило, більш посухостійкі види також виявляються більш толерантними до спеки, тоді як ті, що досить чутливі до посухи, так само, як правило, більш чутливі до тепла. Однак, оскільки ріст і життєздатність дерев залежать від багатьох місцевих факторів, процесів і взаємодій, дослідження взаємозв'язків між кліматом і зростанням і більш детальне розуміння впливу спеки та посухи все ще потрібні. Точні рекомендації щодо або проти вибраних видів у конкретних регіонах дослідження наразі неможливо. Тим не менш, доцільно зосередитися на «дуже толерантних» або принаймні «помірно толерантних» видах. Тому майбутні посадки дерев повинні уникати вибору видів, які класифікуються як «помірно чутливі» або навіть «дуже чутливі» до спеки

та/або посухи.

Аналіз кліматичних прогнозів і допусків деревних порід» показав, що наразі немає негайної потреби в заміні всіх видів дерев, оскільки принаймні деякі з них були класифіковані як «помірно толерантні» або навіть «дуже толерантні» до спеки та посухи. Тому можна припустити, що вони також витримають потенційно зростаючі навантаження в найближчому майбутньому. Проте, як показали контрприклад, інші види можуть стати непридатними в майбутньому або зможуть добре процвітати лише за умови вжиття додаткових заходів (наприклад, зрошення). Однак такі заходи небажані через фінансові обмеження, більші зусилля та можливість того, що заходи можуть навіть не протидіяти всім негативним стресам. Замість цього слід зосередитися на видах, які вимагають лише мінімального догляду або в ідеалі можуть навіть добре впоратися самотійно, наприклад, від обрізки. Зосереджуючись на заходах без жалю, тобто вибираючи переважно посухостійкі та спекотні породи дерев для міських територій, заходи адаптації можуть бути корисними вже сьогодні та зменшити ризик утворення високочутливих міських зелених насаджень у майбутньому. Що стосується розвитку міст, рекомендується підтримувати впровадження дерев за допомогою довгострокового моніторингу, щоб забезпечити успіх майбутніх насаджень. Наразі обговорюється використання немісцевих видів або походження. Однак перед перенесенням нових видів у великих масштабах рекомендується уважно розглянути питання толерантності до інших стресів, занепокоєння, яке висловлюють природоохоронці, а також загальну придатність для міського контексту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aas, G. (2002): *Quercus robur*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*.
2. Aas, G. & Lauerer, M. (2005): Die Gemeine Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*) als Neubürger in unserer Flora. *LWF Wissen*, 84, pp. 17–20.
3. Agard, J., Schipper, E.L.F., Birkmann, J., Campos, M., Dubeux, C., Nojiri, Y., Olsson, L., Osman-Elasha, B., Pelling, M., Prather, M.J., Rivera-Ferre, M.G., Ruppel, O.C., Sallenger, A., Smith, K.R., Clair, A.L.S., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D. & Bilir, T.E. (eds.). (2014): Annex II: Glossary. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (eds.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA): Cambridge University Press, pp. 1757–1776.
4. Aid (ed.) (2014): *Standortansprüche der wichtigsten Waldbaumarten*, Bonn: aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e.V. 48 pages.
5. Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D.D., Hogg, E.H. (Ted), Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A. & Cobb, N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259 (4), pp. 660–684.
6. Aranda, I., Gil, L. & Pardos, J.A. (2000): Water relations and gas exchange in *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. in a mixed stand at their southern limit of distribution in Europe. *Trees*, 14 (6), pp. 344–352.
7. Araújo, M.B. & Peterson, A.T. (2012): Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology*, 93 (7), pp. 1527–1539.
8. Arend, M., Kuster, T., Günthardt-Goerg, M.S. & Dobbertin, M. (2011): Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree physiology*, 31 (3), pp. 287–97.
9. Ricardo Aroca (ed.) (2012): *Plant Responses to Drought Stress. From Morphological to Molecular Features*, Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. 466 pages.
10. Aspelmeier, S. & Leuschner, C. (2005): Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula* Roth): leaf and root morphology and carbon partitioning. *Trees*, 20(1), pp. 42–52.
11. Barry, R.G. & Chorley, R.J. (2009): *Atmosphere, Weather and Climate* 9th ed., London: Routledge. 516 pages.

12. Bassuk, N., Curtis, D.F., Marranca, B.Z. & Neal, B. (2009): Recommended urban trees: Site assessment and tree selection for stress tolerance, Ithaca, New York. 122 pages. Available at:
<http://www.hort.cornell.edu/uhi/outreach/recurbtrees/pdfs/~recurbtrees.pdf>
[Accessed October 15, 2014].
13. Bauer, J. (2012): Die aktualisierte GALK-Straßenbaumliste. In: A. Roloff, D. Thiel, & H. Weiss (eds.): Aktuelle Fragen der Baumpflege, Planung, Wertschätzung und Wirkung von Stadtbäumen. Tagungsband Dresdner StadtBaumtage in Dresden/Tharandt 15./16.03.2012. Dresden: Technische Universität Dresden, pp. 155–169.
14. Beck, W. (2011): Impact of drought and heat on tree and stand vitality – results of the study commissioned by the Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection. In: M. Maaten-Theunissen, H. Spiecker, H. Gärtner, G. Helle, & I. Heinrich (eds.): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Vol. 9. Scientific Technical Report STR 11/07. Potsdam: GFZ Potsdam, pp. 20–27.
15. Bender, S. & Schaller, M. (2014): Vergleichendes Lexikon - Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren, Hamburg: Climate Service Center. 126 pages.
16. Benedikz, T., Ferrini, F., García-Valdecantos, J.L. & Tello, M.-L. (2005): Plant Quality and Establishment. In: C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (eds.): Urban Forests and Trees. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, pp. 232–256.
17. Berland, A. (2012): Long-term urbanization effects on tree canopy cover along an urban–rural gradient. *Urban Ecosystems*, 15 (3), pp. 721–738.
18. Berry, P., Onishi, Y. & Paterson, J. (2012): Understanding the implications of Climate Change for woodland biodiversity and community functioning, Forestry Commission (UK). 1-108 pages. Available at:
http://www.forestry.gov.uk/pdf/Woodland_BioD_Tech_Report_70312_corrected.pdf.
19. BMELV (ed.) (2012): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2012,
20. BMVBS (ed.) (2011): Klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Ursachen und Folgen des Klimawandels durch urbane Konzepte begegnen, Berlin. 100 pages. Available at:
http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Forschungen/2011/Heft149_DL.pdf [Accessed December 14, 2014].
21. Böll, S., Schönfeld, P., Körber, K. & Herrmann, J.V. (2014): Stadtbäume unter Stress. *LWF aktuell*, 98, pp. 4–8.
22. Bolte, A., Beck, W. & Rock, J. (2012): Klimawandel und Klimaschutz erfordern eine Anpassung der Forstwirtschaft. In: C. M. Müller, Monika & M. Hirschmann (eds.): Wald - mehr als Holz. Nutzungsoptionen und Gestaltung

- unserer Wälder. Loccumer Protokolle 54/11. Rehburg-Loccum: Evangelische Akademie Loccum, pp. 71–89.
23. Bourtsoukidis, E., Kawaletz, H., Radacki, D., Schütz, S., Hakola, H., Hellén, H., Noe, S., Mölder, I., Ammer, C. & Bonn, B. (2013): Impact of flooding and drought conditions on the emission of volatile organic compounds of *Quercus robur* and *Prunus serotina*. *Trees*, 28 (1), pp. 193–204.
 24. Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M. & Pullin, A.S. (2010): Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97 (3), pp. 147–155.
 25. Bréda, N., Huc, R., Granier, A. & Dreyer, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63 (6), pp. 625–644.
 26. Breunig, T., Schach, J., Brinkmeier, P. & Nickel, E. (2002): Gebietsheimische Gehölze in Baden-Württemberg, Karlsruhe: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. 91 pages. Available at: http://www.lubw.badenwuerttemberg.de/servlet/is/13938/gebietsheimische_gehoelze.pdf?command=downloadContent&filename=gebietsheimische_gehoelze.pdf [Accessed November 16, 2014].
 27. Broadmeadow, M.S.J., Ray, D. & Samuel, C.J.A. (2005): Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry*, 78 (2), pp. 145–161.
 28. Burk, D. (2006): Physiologische, anatomische und chemische Regulation der Wurzelwasseraufnahme bei Rotbuche, Kiefer und Birke auf zwei unterschiedlich wasserversorgten Standorten. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen. 123 pages.
 29. BWV (2006a): Baumsteckbrief: Spitzahorn (*Acer Platanoides*), fact sheet. 1 page. Available at: http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzer-info/fertige_baumblaetter/Spitzahorn_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
 30. BWV (2006b): Baumsteckbrief: Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), fact sheet. 1 page. Available at: http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Rosskastanie_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
 31. BWV (2006c): Baumsteckbrief: Schwarz- oder Roterle (*Alnus glutinosa*), fact sheet. 1 page. Available at: http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Schwarzerle_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
 32. BWV (2006d): Baumsteckbrief: Hänge- oder Weißbirke (*Betula pendula*), fact sheet. 1 page. Available at: http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Haengebirk_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].

33. BWV (2006e): Baumsteckbrief: Buche, Rotbuche (*Fagus silvatica*), fact sheet. 1 page. Available at:
http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Buche_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
34. BWV (2006f): Baumsteckbrief: Esche (*Fraxinus Excelsior*), fact sheet. 1 page. Available at:
http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzer-info/fertige_baumblaetter/Esche_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
35. BWV (2006g): Baumsteckbrief: Schwarzpappel (*Populus nigra*), Kanadapappel (*Populus x canadensis*), fact sheet. 1 page. Available at:
http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Schwarzpappel_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
36. BWV (2006h): Baumsteckbrief: Stieleiche (*Quercus robur*), Traubeneiche (*Quercus petraea*), fact sheet. 1 page. Available at:
http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzerinfo/fertige_baumblaetter/Stiel-Traubeneiche_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
37. BWV (2006i): Baumsteckbrief: Weidenarten (*Salix spec.*), fact sheet. 1 page. Available at:
http://www.holz-von-hier.de/waldbesitzer-info/fertige_baumblaetter/Weidenarten_hr.pdf [Accessed January 29, 2015].
38. BWV (ed.) (2009): Infoblatt Standortgerechte Baumartenwahl - Wie vorgehen?
39. Carón, M.M., De Frenne, P., Brunet, J., Chabrierie, O., Cousins, S. a O., De Backer, L., Decocq, G., Diekmann, M., Heinken, T., Kolb, A., Naaf, T., Plue, J., Selvi, F., Strimbeck, G.R., Wulf, M. & Verheyen, K. (2015): Interacting effects of warming and drought on regeneration and early growth of *Acer pseudoplatanus* and *A. platanoides*. *Plant biology* (Stuttgart, Germany), 17 (1), pp. 52–62.
40. Centritto, M., Brilli, F., Fodale, R. & Loreto, F. (2011): Different sensitivity of isoprene emission, respiration and photosynthesis to high growth temperature coupled with drought stress in black poplar (*Populus nigra*) saplings. *Tree physiology*, 31 (3), pp. 275–86.
41. Chen, W.Y. & Jim, C.Y. (2008): Assessment and Valuation of the Ecosystem Services Provided by Urban Forests. In: *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests. International Perspectives*. New York: Springer, pp. 53–83.
42. Chiesura, A. (2004): The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68 (1), pp. 129–138.
43. Christidis, N., Jones, G.S. & Stott, P. a. (2014): Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change*, (5), pp. 46–50.
44. Claessens, H., Oosterbaan, A., Savill, P. & Rondeux, J. (2010): A review of the characteristics of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) and their implications for silvicultural practices. *Forestry*, 83 (2), pp. 163–175.

46. Clark, J.R. (2013): Adaptation of ash (*Fraxinus excelsior* L.) to climate change. Dissertation. Bangor University. 215 pages.
47. Climate Service Center 2.0 (ed.) (2014): How to read a Climate-Fact-Sheet. Lese- und Interpretationsanleitung für die Climate-Fact-Sheets, Hamburg: Climate Service Center 2.0. 21 pages.
48. Coccozza, C., Cherubini, P., Regier, N., Saurer, M., Frey, B. & Tognetti, R. (2010): Early effects of water deficit on two parental clones of *Populus nigra* grown under different environmental conditions. *Functional Plant Biology*, (37), pp. 244–254.
49. Copolovici, L., Kännaste, A., Rimmel, T. & Niinemets, Ü. (2014): Volatile organic compound emissions from *Alnus glutinosa* under interacting drought and herbivory stresses. *Environmental and Experimental Botany*, 100, pp. 55–63.
50. Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N. & Winther, J.-G. (2013): Introduction. In: T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (eds.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
51. Czajkowski, T., Kühling, M. & Bolte, A. (2005): Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 176 (8), pp. 133–143.
52. Danielzik + Leuchter Landschaftsarchitekten (ed.) (2012): *Duisburger Straßenbäume. Konzept zur Erweiterung und stetigen Erneuerung des Bestandes*, Duisburg. 48 pages. Available at: http://www.duisburg.de/micro2/duisburg_gruen/medien/bindata/Allgemeiner_Textteil.pdf [Accessed January 7, 2015].
53. Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., Bhave, A.G., Mittal, N., Feliu, E. & Faehnle, M. (2014): Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, pp. 107–115.
54. Dickson, R.E. & Tomlinson, P.T. (1996): Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress. *Annals of Forest Science*, 53, pp. 181–196.
55. Dimoudi, A. & Nikolopoulou, M. (2003): Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*, 35, pp. 69–76.
56. Dittmar, C. & Elling, W. (2007): Dendroecological investigation of the vitality of Common Beech (*Fagus sylvatica* L.) in mixed mountain forests of the Northern Alps (South Bavaria). *Dendrochronologia*, 25 (1), pp. 37–56.

57. Dittmar, C., Zech, W. & Elling, W. (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study. *Forest Ecology and Management*, 173, pp. 63–78.
58. Doick, K. & Hutchings, T. (2013): Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure, Farnham: Forestry Commission (UK). 1-10 pages. Available at:
[http://www.forestry.gov.uk/PDF/FCRN012.pdf/\\$FILE/FCRN012.pdf](http://www.forestry.gov.uk/PDF/FCRN012.pdf/$FILE/FCRN012.pdf) [Accessed January 8, 2015].
59. Duhme, F. & Pauleit, S. (2000): The dendrofloristic richness of SE-Europe, a phenomenal treasure for urban plantings. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 370, pp. 23–29.
60. Durand, T.C., Sergeant, K., Renaut, J., Planchon, S., Hoffmann, L., Carpin, S., Label, P., Morabito, D. & Hausman, J.F. (2011): Poplar under drought: comparison of leaf and cambial proteomic responses. *Journal of proteomics*, 74 (8), pp. 1396–1410.
61. DWD (2015a): The Climate of Germany, web page. Available at:
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_ueberwachung_deutschland&T38600134241169726338086gsbDocumentPath=Content%2FOeffentlichkeit%2FKU%2FKU2%2FKU23%2Fdeutschlandklima%2Fteaser_deutschlandklima.html [Accessed January 29, 2015].
62. DWD (2015b): Deutscher Klimaatlas, web page. Available at:
www.dwd.de/klimaatlas [Accessed January 15, 2015].
63. EEA (2012a): Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies, Copenhagen: European Environment Agency. 143 pages.
64. EEA (2012b): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report, Copenhagen: European Environment Agency. 300 pages.
65. Ellenberg, H. & Leuschner, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht* 6th ed., Stuttgart: UTB. 1333 pages.
66. EPA (2014): Future Climate Change, web page. Available at:
<http://www.epa.gov/climatechange/science/future.html> [Accessed February 23, 2015].
68. Epron, D. & Dreyer, E. (1993): Long-term effects of drought on Photosynthesis of Adult Oak Trees [*Quercus petraea* (Matth.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a Natural Stand. *New Phytologist*, 125 (2), pp. 381–389.
69. Escobedo, F.J. & Nowak, D.J. (2009): Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 90 (3-4), pp. 102–110.

70. EURO-CORDEX initiative (2015): EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain, web page. Available at: <http://www.euro-cordex.net> [Accessed April 15, 2015].
71. European Commission (2009): Regions 2020 - The Climate Change Challenge For European Regions, Brussels: European Commission. 1-27 pages.
72. Falk, W. & Hempelmann, N. (2013): Species Favourability Shift in Europe due to Climate Change: A Case Study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. Based on an Ensemble of Climate Models. *Journal of Climatology*, pp. 1–18.
73. Falk, W., Mellert, K., Bachmann-Gigl, U. & Kölling, C. (2013): Bäume für die Zukunft: Baumartenwahl auf wissenschaftlicher Grundlage. *LWF aktuell*, 94, pp. 8–11.
74. Felbermeier, B. & Mosandl, R. (2002): *Fagus sylvatica*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*.
75. Fichot, R., Barigah, T.S., Chamaillard, S., Le Thiec, D., Laurans, F., Cochard, H. & Brignolas, F. (2010): Common trade-offs between xylem resistance to cavitation and other physiological traits do not hold among unrelated *Populus deltoides* × *Populus nigra* hybrids. *Plant, Cell and Environment*, 33, pp. 1553–1568.
76. Fischer, N. (2005): Bedeutung der Rosskastanie und das hieraus resultierende Nachfragepotential. *LWF Wissen*, 48, pp. 41–44.
77. Forman, R.T.T. (2014): *Urban ecology: science of cities*, New York: Cambridge University Press. 462 pages.
78. Fort, C., Muller, F., Label, P., Granier, A. & Dreyer, E. (1998): Stomatal conductance, growth and root signaling in *Betula pendula* seedlings subjected to partial soil drying. *Tree physiology*, 18, pp. 769–776.
79. Fotelli, M.N., Nahm, M., Radoglou, K., Rennenberg, H., Halyvopoulos, G. & Matzarakis, A. (2009): Seasonal and interannual ecophysiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) at its south-eastern distribution limit in Europe. *Forest Ecology and Management*, 257 (3), pp. 1157–1164.
80. Friedrichs, D. a, Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. & Löffler, J. (2009): Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. *Tree Physiology*, 29 (1), pp. 39–51.
81. Friedrichs, D.A. (2008): Spatio-temporal patterns of tree-growth response to climatic change. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
82. GALK (2008): Checkliste Baumpflanzungen – Worauf ist bei der Planung von Baumquartieren und bei Baumpflanzungen zu achten?, fact sheet. 3 pages. Available at: http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/down/checkliste_pflanzung_080529.pdf [Accessed February 1, 2015].

83. GALK (2011): Verwendung von nicht heimischen Baumarten am innerstädtischen Straßenstandort, position paper. 4 pages. Available at: http://www.galk.de/projekte/pr_down/pospapier_heimischebaumarten_flyer1011.pdf [Accessed November 10, 2014].
84. GALK (2015): GALK Straßenbaumliste (online version), web page. Available at: http://www.galk.de/arbeitskreise/ak_stadtbaeume/webprojekte/sbliste/ [Accessed March 25, 2015].
85. Gallé, A. & Feller, U. (2007): Changes of photosynthetic traits in beech saplings (*Fagus sylvatica*) under severe drought stress and during recovery. *Physiologia plantarum*, 131 (3), pp. 412–21.
86. García-Plazaola, J.I. & Becerril, J.M. (2000): Effects of drought on photoprotective mechanisms in European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from different provenances. *Trees*, 14 (8), pp. 485–490.
87. Gartner, K., Nadezhdina, N., Englisch, M., Čermak, J. & Leitgeb, E. (2009): Sap flow of birch and Norway spruce during the European heat and drought in summer 2003. *Forest Ecology and Management*, 258 (5), pp. 590–599.
88. Gärtner, S., Reif, A., Xystrakis, F., Sayer, U., Bendagha, N. & Matzarakis, A. (2008): The drought tolerance limit of *Fagus sylvatica* forest on limestone in southwestern Germany. *Journal of Vegetation Science*, 19 (6), pp. 757–768.
89. Geßler, A., Keitel, C., Kreuzwieser, J., Matyssek, R., Seiler, W. & Rennenberg, H. (2006): Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*, 21 (1), pp. 1–11.
90. Gieger, T. (2002): Auswirkungen von Trockenheit und Entlaubung auf den Wasserhaushalt von Stiel- und Traubeneiche. Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen. 132 pages.
91. Gill, D., Magin, G. & Bertram, E. (2013): *Trees and Climate Change. A guide to the factors that influence species vulnerability and a summary of adaptation options*, Cambridge: Fauna & Flora International. 16 pages. Available at: <http://www.fauna-flora.org/wpcontent/uploads/Trees-Species-Vulnerability-to-Climate-Change.pdf> [Accessed December 13, 2014].
92. Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, A.R. & Pauleit, S. (2014): Adapting The Role Cities for Climate of the Green Change : Infrastructure. *Built Environment*, 33 (1), pp. 115–133.
93. Gillner, S. (2012): Stadtbäume im Klimawandel – Dendrochronologische und physiologische Untersuchungen zur Identifikation der Trockenstressempfindlichkeit häufig verwendeter Stadtbaumarten in Dresden. Dissertation. Technische Universität Dresden. 229 pages.
94. Gillner, S., Bräuning, A. & Roloff, A. (2014): Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees*, 28 (4), pp. 1079–1093.
95. Gillner, S. & Roloff, A. (2011): Anpassungsbedarf für den Stadtbaumbestand – Dendrochronologische und ökophysiologische Ergebnisse. Projektreport,

- Dresden: REGKLAM - Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden. 120 pages. Available at: http://www.regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/Ergebnisberichte/P3.1.2d_Stadtbaeume_Dendrochronologie_TUD_EB.pdf [Accessed January 5, 2015].
96. Gillner, S., Vogt, J. & Roloff, A. (2013): Climatic response and impacts of drought on oaks at urban and forest sites. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12 (4), pp. 597–605.
 97. Gilman, E.F. & Sadowski, L. (2007): Choosing suitable trees for urban and suburban sites: site evaluation and species selection, Gainesville: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Available at: http://orange.ifas.ufl.edu/mg/mg_compendium/pdf/ep/ep31000.pdf [Accessed October 29, 2014].
 98. Grundmann, B.M., Bonn, S. & Roloff, A. (2008): Cross-dating of highly sensitive Common beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring series with numerous missing rings. *Dendrochronologia*, 26 (2), pp. 109–113.
 99. Guicherd, P., Peltier, J.P., Gout, E., Bligny, R. & Marigo, G. (1997): Osmotic adjustment in *Fraxinus excelsior* L.: malate and mannitol accumulation in leaves under drought conditions. *Trees*, 11, pp. 155–161.
 100. Gurk, C. & Hepp, C. (2015): Baumkunde.de - Online Database for Trees and Shrubs, web page. Available at: <http://www.baumkunde.de> [Accessed April 10, 2015].
 101. Hacke, U., Sauter, J.J. & Kiel, D.- (2014): Drought-induced Xylem Dysfunction in Petioles, Branches, and Roots of *Populus balsamifera* L. and *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. *Plant Physiology*, 111 (2), pp. 413–417.
 102. Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, a. M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. & New, M. (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, pp. 1–12.
 103. Heidt, V. & Neef, M. (2008): Benefits of Urban Green Space for Improving Urban Climate. In: *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests. International Perspectives*. New York: Springer, pp. 84–96.
 104. Heim, R.R. (2002): A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, August, pp. 1149–1165.
 105. Hemery, G.E. (2007): *Trees and Climate Change. A Practical Guide for Woodland Owners & Managers*, Nicholsons. 8 pages. Available at: http://sylva.org.uk/forestryhorizons/documents/Nicholsons_ClimateChange_PracticalGuide.pdf [Accessed November 18, 2014].
 106. Hennemuth, B., Bender, S., Bülow, K., Dreier, N., Keup-Thiel, E., Krüger, O., Mudersbach, C., Radermacher, C. & Schoetter, R. (2013): Statistical

methods for the analysis of simulated and observed climate data Applied in projects and institutions dealing with climate change impact and adaptation, Hamburg: Climate Service Center. 135 pages.

107. Herrero, A., Castro, J., Zamora, R., Delgado-Huertas, A. & Querejeta, J.I. (2013): Growth and stable isotope signals associated with drought-related mortality in saplings of two coexisting pine species. *Oecologia*, 173 (4), pp. 1613–1624.
108. Hölscher, D., Koch, O., Korn, S. & Leuschner, C. (2005): Sap flux of five co-occurring tree species in a temperate broad-leaved forest during seasonal soil drought. *Trees*, 19 (6), pp. 628–637.
109. Huber, G. (2010): Allgemeine Verbreitung und Ökologie der Schwarzpappel. *LWF Wissen*, 64, pp. 9–14.
110. Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B. & Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14 (2), pp. 563–578.
111. Jones, H.G. (2014): *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* 3rd ed., Cambridge: Cambridge University Press. 407 pages.
112. Karliński, L., Jagodziński, A.M., Leski, T., Butkiewicz, P., Brosz, M. & Rudawska, M. (2014): Fine root parameters and mycorrhizal colonization of horse chestnut trees (*Aesculus hippocastanum* L.) in urban and rural environments. *Landscape and Urban Planning*, 127, pp. 154–163.
113. Khalil, A.A.M. & Grace, J. (1992): Acclimation to Drought in *Acer pseudoplatanus* L. (Sycamore) Seedlings. *Journal of Experimental Botany*, 43 (257), pp. 1591–1602.
114. Kleerekoper, L., van Esch, M. & Salcedo, T.B. (2012): How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, pp. 30–38.
115. Köcher, P., Gebauer, T., Horna, V. & Leuschner, C. (2009): Leaf water status and stem xylem flux in relation to soil drought in five temperate broad-leaved tree species with contrasting water use strategies. *Annals of Forest Science*, 66, p. 101.
116. Koller, S., Holland, V. & Brüggemann, W. (2013): Effects of drought stress on the evergreen *Quercus ilex* L., the deciduous *Q. robur* L. and their hybrid *Q. × turneri* Willd. *Photosynthetica*, 51 (4), pp. 574–582.

117. Kölling, C. (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFZ-DerWald*, 23, pp. 1242–1245.
118. Kölling, C., Dietz, E., Falk, W. & Mellert, K. (2009a): Provisorische Klima-Risikokarten als Planungshilfe für den klimagerechten Waldumbau in Bayern. *Forst und Holz*, 64 (7/8), pp. 40–47.
119. Kölling, C., Dietz, E., Falk, W. & Mellert, K. (2009b): Provisorische Klima-Risikokarten als Planungshilfen für den klimagerechten Waldumbau in Bayern. *LWF Wissen*, 63, pp. 31–39.
120. Kölling, C. & Walentowski, H. (2001): Die Rolle der Esche (*Fraxinus excelsior*) in einheimischen Waldgesellschaften. *LWF Wissen*, 34, pp. 6–20.
121. CC Konijnendijk, K Nilsson, TB Randrup, J Schipperijn (eds.) (2005): *Urban Forests and Trees. A Reference Book*, Berlin Heidelberg New York: Springer. 520 pages.
122. Kotlarski, S., Keuler, K., Christensen, O.B., Colette, A., Déqué, M., Gobiet, A., Goergen, K., Jacob, D., Lüthi, D., van Meijgaard, E., Nikulin, G., Schär, C., Teichmann, C., Vautard, R., Warrach-Sagi, K. & Wulfmeyer, V. (2014): Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7 (4), pp. 1297–1333.
123. Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M. & Soussana, J.-F. (2014): Europe. In: V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. GirmaE, S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (eds.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, pp. 1267–1326.
124. Kuttler, W. (2008): The Urban Climate - Basic and Applied Aspects. In: J. M. Marzluff, E. Shulenberg, W. Endlicher, M. Alberti, G. Bradley, C. Ryan, C. ZumBrunnen, & U. Simon (eds.): *Urban Ecology. An International Perspective on the Interaction Between Humand and Nature*. New York: Springer, pp. 233–248.
125. Larcher, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen* 6th ed., Stuttgart: UTB. 408 pages.
126. Lemoine, D., Peltier, J. & Marigo, G. (2001): Comparative studies of the water relations and the hydraulic characteristics in *Fraxinus excelsior*, *Acer pseudoplatanus* and *A. Opalus* trees under soil water contrasted conditions. *Annals of Forest Science*, 58, pp. 723–731.
127. Lenzion, J. & Leuschner, C. (2008): Growth of European beech (*Fagus sylvatica* L.) saplings is limited by elevated atmospheric vapour pressure deficits. *Forest Ecology and Management*, 256 (4), pp. 648–655.

128. Leuschner, C. (2009): Die Trockenheitsempfindlichkeit der Rotbuche vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels. In: Jahrbuch der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen 2008. Berlin: Walter de Gruyter, pp. 281–296.
129. Leuschner, C., Backes, K., Hertel, D., Schipka, F., Schmitt, U., Terborg, O. & Runge, M. (2001): Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years. *Forest Ecology and Management*, 149, pp. 33–46.
130. Leuzinger, S., Vogt, R. & Körner, C. (2010): Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (1), pp. 56–62.
131. Li, Y.Y., Wang, X.R. & Huang, C.L. (2011): Key street tree species selection in urban areas. *African Journal of Agricultural Research*, 6 (15), pp. 3539–3550.
132. Herbert Liedtke, Joachim Marcinek (eds.) (2002): *Physische Geographie Deutschlands* 3rd ed., Gotha; Stuttgart: Klett-Perthes. 786 pages.
133. Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J. & Marchetti, M. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259 (4), pp. 698–709.
134. LÖBF (2001): Standortgerechte Baumartenwahl in NRW, poster. 1 page. Available at:
http://www.wald-undholz.nrw.de/fileadmin/_recycler_/Standortgerechte_Baumartenwahl_08_2001.pdf [Accessed October 3, 2014].
135. Marigo, G., Peltier, J.-P., Girel, J. & Pautou, G. (2000): Success in the demographic expansion of *Fraxinus excelsior* L. *Trees*, 15 (1), pp. 1–13.
136. Marron, N., Maury, S., Rinaldi, C. & Brignolas, F. (2006): Impact of drought and leaf development stage on enzymatic antioxidant system of two *Populus deltoides* × *nigra* clones. *Annals of Forest Science*, 63, pp. 323–327.
137. Matzarakis, A. & Amelung, B. (2008): Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. In: M. C. Thomson, R. Garcia-Herrera, & M. Beniston (eds.): *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*. New York: Springer, pp. 161–172.
138. Mavrogianni, a., Davies, M., Batty, M., Belcher, S., Bohnenstengel, S., Carruthers, D., Chalabi, Z., Croxford, B., Demanuele, C., Evans, S., Giridharan, R., Hacker, J., Hamilton, I., Hogg, C., Hunt, J., Kolokotroni, M., Martin, C., Milner, J., Rajapaksha, I., Ridley, I., Steadman, J., Stocker, J., Wilkinson, P. & Ye, Z. (2011): The comfort, energy and health implications of London's urban heat island. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32 (1), pp. 35–52.

139. McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D.G. & Yepez, E. a (2008): Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *The New phytologist*, 178 (4), pp. 719–39.
140. Meier, I.C. & Leuschner, C. (2008): Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global Change Biology*, 14 (9), pp. 2081–2095.
141. Meinardus, C. & Bräuning, A. (2011): Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen. *LWF aktuell*, 85, pp. 9–11.
142. MELUR (ed.) (2013): Waldzustandsbericht Schleswig-Holstein 2013, Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Available at: http://www.nwfva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZEBerichte/WZB2013_Schleswig-Holstein_Internet.pdf [Accessed December 16, 2014].
143. Memon, R.A., Leung, D.Y.C. & Chunho, L. (2008): A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of environmental sciences*, 20 (1), pp. 120–8.
144. Memon, R.A., Leung, D.Y.C. & Liu, C.-H. (2009): An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94 (3), pp. 491–500.
145. Michelot, A., Bréda, N., Damesin, C. & Dufrêne, E. (2012): Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 265, pp. 161–171.
146. MIL (ed.) (2013): Waldzustandsbericht Brandenburg 2013, Potsdam: Landesbetrieb Forst Brandenburg. 39 pages. Available at: http://www.mil.brandenburg.de/media_fast/4055/wzb_2013_online.pdf [Accessed December 16, 2014].
147. MKULNV (ed.) (2013): Waldzustandsbericht NRW 2013 - Langfassung, Düsseldorf: Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen. 74 pages. Available at: http://www.umwelt.nrw.de/extern/epaper/2013/waldzustandsbericht_langfassung/index.html#/1/ [Accessed December 16, 2014].
148. MLR Baden-Württemberg (ed.) (2013): Waldzustandsbericht Baden-Württemberg 2013, Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. 65 pages. Available at: <http://www.fva-bw.de/publikationen/wzb/ws2013.pdf> [Accessed December 16, 2014].
149. Monclus, R., Dreyer, E., Villar, M., Delmotte, F.M., Delay, D., Petit, J., Barbaroux, C., Thiec, D. Le, Bréchet, C. & Brignolas, F. (2006): Impact of

- drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytologist*.
150. Muck, P., Borchert, H., Hahn, J., Immler, T., Joos, A., Konnert, M., Walentowski, H. & Walter, A. (2009): Die Rotbuche – Mutter des Waldes. LWF, 69, pp. 54–57.
 151. Müller-Westermeier, G., Kreis, A. & Dittmann, E. (1999): Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland. Teil 1: Lufttemperatur, Niederschlagshöhe, Sonnenscheindauer, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst. 23 pages.
 152. Müller-Westermeier, G., Kreis, A. & Dittmann, E. (2001): Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland. Teil 2: Verdunstung, Maximumtemperatur, Minimumtemperatur, Kontinentalität, Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst. 19 pages.
 153. MUNVL (ed.) (2010): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel, Essen. 268 pages.
 154. Murray, J.S. (1978): Death of bark in *Acer pseudoplatanus* associated with drought. *Forest Pathology*, 8 (2), pp. 65–75.
 155. Nahm, M., Matzarakis, A., Rennenberg, H. & Geßler, A. (2006): Seasonal courses of key parameters of nitrogen, carbon and water balance in European beech (*Fagus sylvatica* L.) grown on four different study sites along a European North–South climate gradient during the 2003 drought. *Trees*, 21 (1), pp. 79–92.
 156. Niinemets, Ü. & Valladares, F. (2006): Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*, 76 (4), pp. 521–547.
 157. Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P., Osman-Elasha, B. & Villamizar, A. (2014): Adaptation Needs and Options. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, E. S. K. B. Girma, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (eds.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., ed., Cambridge, New York: Cambridge University Press, pp. 833–868.
 158. NW-FVA (ed.) (2013a): Waldzustandsbericht Sachsen-Anhalt 2013, Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Available at: http://www.nwfva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZEBerichte/WZB2013_Sachsen_Anhalt_Internet.pdf [Accessed December 16, 2014].
 159. NW-FVA (ed.) (2013b): Waldzustandsbericht Hessen 2013, Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Available at:

https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/453_-_02_12_wzbhessen2013_internet.pdf [Accessed December 16, 2014].

160. NW-FVA (ed.) (2014): Waldzustandsbericht Niedersachsen 2014, Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. 40 pages. Available at: http://www.ml.niedersachsen.de/download/91560/Waldzustand_Niedersachsen_2014.pdf [Accessed December 16, 2014].
161. Oke, T.R. (1988): The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12 (4), pp. 471–508.
162. Ottitsch, A. & Krott, M. (2005): Urban Forest Policy and Planning. In: C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (eds.): *Urban forests and trees*. Berlin Heidelberg New York: Springer, pp. 117–148.
163. Pauleit, S. (2003): Urban street tree plantings: identifying the key requirements. *Proceedings of the ICE - Municipal Engineer*, 156 (1), pp. 43–50.
164. Pearson, R.G. & Dawson, T.P. (2003): Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12 (5), pp. 361–371.
165. Percival, G.C., Keary, I.P. & AL-Habsi, S. (2006): An assessment of the drought tolerance of *Fraxinus* genotypes for urban landscape plantings. *Urban Forestry & Urban Greening*, 5 (1), pp. 17–27.
166. Percival, G.C. & Noviss, K. (2008): Triazole induced drought tolerance in horse chestnut (*Aesculus hippocastanum*). *Tree Physiology*, 28 (11), pp. 1685–1692.
167. Peuke, a. D. & Rennenberg, H. (2004): Carbon, nitrogen, phosphorus, and sulphur concentration and partitioning in beech ecotypes (*Fagus sylvatica* L.): phosphorus most affected by drought. *Trees*, 18 (6), pp. 639–648.
168. Pfeifer, S., Bülow, K., Gobiet, A., Hänsler, A., Mudelsee, M., Otto, J., Rechid, D., Teichmann, C. & Jacob, D. (2015): Robustness of Ensemble Climate Projections Analyzed with Climate Signal Maps: Seasonal and Extreme Precipitation for Germany. *Atmosphere*, 6, pp. 677–698.
169. Pietzarka, U. & Roloff, A. (2000): *Alnus glutinosa*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–16.
170. Pretzsch, H., Rötzer, T., Matyssek, R., Grams, T.E.E., Häberle, K.-H., Pritsch, K., Kerner, R. & Munch, J.-C. (2014): Mixed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) stands under drought: from reaction pattern to mechanism. *Trees*, 28 (5), pp. 1305–1321.
171. Ragazzi, A., Moricca, S., Turco, E. & Dellavalle, I. (2002): Dendroclimatic analysis of «*Quercus robur*» infected with «*Fusarium eumartii*». *Phytopathologia Mediterranea*, 41, pp. 131–137.
172. Regier, N., Streb, S., Coccozza, C., Schaub, M., Cherubini, P., Zeeman, S.C. & Frey, B. (2009): Drought tolerance of two black poplar (*Populus nigra* L.)

- clones: contribution of carbohydrates and oxidative stress defence. *Plant, cell & environment*, 32 (12), pp. 1724–36.
173. Reif, A., Brucker, U., Kratzer, R., Schmiedinger, A. & Bauhus, J. (2010): *Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes*, Freiburg: Bundesamt für Naturschutz (BfN). 125 pages.
174. Rennenberg, H., Loreto, F., Polle, a, Brilli, F., Fares, S., Beniwal, R.S. & Gessler, a (2006): Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant biology* (Stuttgart, Germany), 8 (5), pp. 556–71.
175. Revi, A., Satterthwaite, D.E., Aragón-Durand, F., J. Corfee-Morlot, R.B.R.K., Pelling, M., Roberts, D.C. & Solecki, W. (2014): Urban Areas. In: C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, E. S. K. B. Girma, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R.
176. Mastrandrea, & L. L. White (eds.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, pp. 535–612.
177. Richter, H. & Kikuta, S. (2014): Ecophysiology of Long-Distance Water Transport in Trees. In: M. Tausz & N. Grulke (eds.): *Trees in a Changing Environment*. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer, pp. 98–115.
178. Roloff, A. (2005): *Biologie und Ökologie der Rosskastanie (Aesculus hippocastanum L.)*. LWF Wissen, 48, pp. 13–16.
179. Roloff, A. (2010): *Bäume : Lexikon der praktischen Baumbiologie*, Weinheim: Wiley-VCH. 215 pages.
180. Roloff, A. (2013a): *Bäume in der Stadt: Besonderheiten - Funktion - Nutzen - Arten - Risiken*, Stuttgart: Ulmer Eugen Verlag. 256 pages.
181. Roloff, A. & Bonn, S. (2008): *Klimawandel und Gehölze.*, Pinneberg: Bund deutscher Baumschulen (BdB). 42 pages. Available at: http://www.gruen-istleben.de/fileadmin/content/pdf/Hintergrund/Klimawandel_Sonderheft_8_08_Nachdruck.pdf [Accessed November 29, 2014].
182. Roloff, A. & Grundmann, B.M. (2008a): *Waldbaumarten und ihre Verwendung im Klimawandel*, Berlin: Landesforstanstalt Eberswalde. 16 pages. Available at: https://www.researchgate.net/publication/259192589_Waldbaumarten_und_ihre_Verwendung_im_Klimawandel [Accessed October 28, 2014].
183. Roloff, A. & Grundmann, B.M. (2008b): *Klimawandel und Baumarten-Verwendung für Waldökosysteme*, Dresden: Technische Universität Dresden. 46 pages. Available at: <http://www.wald-in-not.de/download/KLAM.pdf> [Accessed October 29, 2014].

184. Roloff, A., Korn, S. & Gillner, S. (2009): The Climate-Species-Matrix to select tree species for urban habitats considering climate change. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8 (4), pp. 295–308.
185. Roloff, A. & Pietzarka, U. (1997): *Fraxinus excelsior*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–16.
186. Roloff, A. & Pietzarka, U. (2000): *Betula pendula*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*.
187. Andreas Roloff (ed.) (2013b): *Baumpflege: Baumbiologische Grundlagen und Anwendung*, Stuttgart (Hohenheim): Ulmer. 219 pages.
188. Rosner, S. (2012): Acoustic Emission Related to Stomatal Closure of Four Deciduous BroadLeaved Woody Species. *Journal of Acoustic Emission*, (30), pp. 11–20.
189. Ryan, M.G. (2011): Tree responses to drought. *Tree Physiology*, 31 (3), pp. 237–239.
190. Saccone, P., Delzon, S., Pagès, J.-P., Brun, J.-J. & Michalet, R. (2009): The role of biotic interactions in altering tree seedling responses to an extreme climatic event. *Journal of Vegetation Science*, 20 (3), pp. 403–414.
191. Sæbø, A., Borzan, Ž., Ducatillion, C., Hatzistathis, A., Lagerström, T., Supuka, J., GarcíaValdecantos, J.L., Rego, F. & Slycken, J. Van (2005): The Selection of Plant Materials for Street Trees, Park Trees and Urban Woodland. In: C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (eds.): *Urban Forests and Trees*. Springer, pp. 257–280.
192. Sala, A., Piper, F. & Hoch, G. (2010): Physiological mechanisms of drought-induced tree mortality are far from being resolved. *New Phytologist*, 186, pp. 274–281.
193. Sanders, T., Pitman, R. & Broadmeadow, M. (2014): Species-specific climate response of oaks (*Quercus* spp.) under identical environmental conditions. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 7 (2), pp. 61–69.
194. SBI (2014): Herausforderung Klimakompetenz in der Stadtplanung, Oestrich-Winkel: Sustainable Business Institute. 36 pages. Available at: http://www.cfi21.org/fileadmin/user_upload/pdfs/Berichte/2014-SBI-StadtplanerStudie.pdf.
195. Scharnweber, T., Manthey, M., Criegee, C., Bauwe, A., Schröder, C. & Wilmking, M. (2011): Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management*, 262 (6), pp. 947–961.
196. Scherrer, D., Bader, M.K.-F. & Körner, C. (2011): Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12), pp. 1632–1640.

197. Schirmer, R. & Stimm, B. (1999): *Salix alba*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–16.
198. Schmidt, C. & Roloff, A. (1996): *Aesculus hippocastanum*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–10.
199. Schmidt, O. (2014): »Urban Forestry« – Chance für die Forstwirtschaft. LWF aktuell, 98, pp. 9–11.
200. Schmidt, O. & Roloff, A. (1998): *Acer Platanoides* L. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–16.
201. Schmidt, O. & Roloff, A. (2009): *Acer pseudoplatanus*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–26.
202. Schneidewind, A. (2004): Untersuchungen zur Standorteignung von *Acer pseudoplatanus* L. als Straßenbaum in Mitteldeutschland unter besonderer Berücksichtigung abiotischer und biotischer Stressfaktoren. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin. 152 pages.
203. Schönfeld, P., Böll, S., Körber, K. & Herrmann, J.V. (2011): Stadtbaumarten im Klimawandel - Projekt "Stadtgrün 2021," Veitshöchheim: LWG. 14 pages.
204. Schuchardt, B., Wittig, S., Mahrenholz, P., Kartschall, K., Mäder, C., Haße, C. & Daschkeit, A. (2008): Deutschland im Klimawandel - Anpassung ist notwendig, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. 15 pages. Available at: http://www.ufz.de/export/data/1/26723_Deutschland_im_Klimawandel.pdf [Accessed September 27, 2014].
205. Schulze, E.-D., Beck, E. & Müller-Hohenstein, K. (2005): Plant Ecology, Berlin Heidelberg: Springer. 692 pages.
206. Schwanz, P., Polle, A., Institut, F. & Go, D.- (2001): Differential stress responses of antioxidative systems to drought in pendunculate oak (*Quercus robur*) and maritime pine (*Pinus pinaster*) grown under high CO₂ concentrations. *Journal of Experimental Botany*, 52 (354), pp. 133–143.
207. Seifert, S. (2011): Variation of candidate genes related to climate change in European beech (*Fagus sylvatica* L.). Dissertation. Georg-August-Universität zu Göttingen. 142 pages.
208. Sellin, A., Eensalu, E. & Niglas, A. (2009): Is distribution of hydraulic constraints within tree crowns reflected in photosynthetic water-use efficiency? An example of *Betula pendula*. *Ecological Research*, 25 (1), pp. 173–183.
209. Sergeant, K., Spiess, N., Renaut, J., Wilhelm, E. & Hausman, J.F. (2011): One dry summer: a leaf proteome study on the response of oak to drought exposure. *Journal of proteomics*, 74 (8), pp. 1385–95.
210. Siewniak, M. & Kusche, D. (2009): Baumpflege Heute, Berlin, Hannover: Patzer Verlag. 269 pages.

211. Simms, E.L. (2000): Defining tolerance as a norm of reaction. *Evolutionary Ecology*, 14, pp. 563–570.
212. Sjöman, H., Gunnarsson, A., Pauleit, S. & Bothmer, R. (2012): Selection Approach of Urban Trees for Inner-city Environments: Learning from Nature. *Arboriculture & Urban Forestry*, 38 (5), pp. 194–204.
213. Spieß, N., Oufir, M., Matušíková, I., Stierschneider, M., Kopecky, D., Homolka, A., Burg, K., Fluch, S., Hausman, J.-F. & Wilhelm, E. (2012): Ecophysiological and transcriptomic responses of oak (*Quercus robur*) to long-term drought exposure and rewatering. *Environmental and Experimental Botany*, 77, pp. 117–126.
214. Stöhr, A. (2003): Der Wasserhaushalt von *Fraxinus excelsior* und *Acer pseudoplatanus* in einem Eschen-Ahorn-Schluchtenwald. Dissertation. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. 188 pages.
215. Stöhr, A. & Lösch, R. (2004): Xylem sap flow and drought stress of *Fraxinus excelsior* saplings. *Tree Physiology*, 24, pp. 169–180.
216. Suttmöller, J., Spellmann, H., Fiebiger, C. & Albert, M. (2008): Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland The effects of climate change on beech forests in Germany. *Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche*, 3, pp. 135 – 157.
217. Tesche, M. (1992): Klimaresistenz. In: H. Lyr, H. J. Fiedler, & W. Tranquillini (eds.): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. Jena / Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, pp. 279–306.
218. Thomas, F.M. & Gausling, T. (2000): Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. *Annals of Forest Science*, 57 (4), pp. 325–333.
219. Tissier, J., Lambs, L., Peltier, J. & Marigo, G. (2004): Relationships between hydraulic traits and habitat preference for six *Acer* species occurring in the French Alps. *Annals of Forest Science*, 61, pp. 81–86.
220. TU Dresden (2016): CITREE - Gehölze für urbane Räume. Planungsdatenbank, Available at: <http://citree.ddns.net/index.php> [Accessed March 1, 2016].
221. Tulik, M. (2014): The anatomical traits of trunk wood and their relevance to oak (*Quercus robur* L.) vitality. *European Journal of Forest Research*, 133 (5), pp. 845–855.
222. Türk, W. (1999): Die Weiden der Auen und ihre Pflanzengesellschaften. *LWF Wissen*, 24, pp. 1–8.
223. UK Forestry Commission (2015): Right Trees for Changing Climate Database, web page. Available at: <http://www.righttree4cc.org.uk> [Accessed March 13, 2015].
224. Umweltbundesamt (ed.) (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität, Dessau-Roßlau. 689 pages.

225. Urli, M., Lamy, J.-B., Sin, F., Burlett, R., Delzon, S. & Porté, A.J. (2014): The high vulnerability of *Quercus robur* to drought at its southern margin paves the way for *Quercus ilex*. *Plant Ecology*, 216 (2), pp. 177–187.
226. Vasconcelos, A.C., Matthes, U. & Konold, W. (2013): Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP) – Themenblatt zu den Methoden und Ergebnissen des Moduls Wald, Trippstadt: Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen. 15 pages. Available at: http://www.waldrp.de/fileadmin/website/klimland/downloads/Ergebnisse/Themenblatt_Wald_IV.pdf [Accessed November 19, 2014].
227. van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. & Rose, S.K. (2011): The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109, pp. 5–31.
228. Walentowski, H. & Ewald, J. (2003): Die Rolle der Schwarzerle in den Pflanzengesellschaften Mitteleuropas. *LWF Wissen*, 42, pp. 11–19.
229. Weber-Blaschke, G., Heitz, R., Blaschke, M. & Ammer, C. (2008): Growth and nutrition of young European ash (*Fraxinus excelsior* L.) and sycamore maple (*Acer pseudoplatanus* L.) on sites with different nutrient and water statuses. *European Journal of Forest Research*, 127 (6), pp. 465–479.
230. Weisgerber, H. (1999): *Populus nigra*. In: A. Roloff, H. Weisgerber, U. M. Lang, & B. Stimm (eds.): *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie III-2*. Weinheim: Wiley-VCH, pp. 1–18.
231. van der Werf, G.W., Sass-Klaassen, U.G.W. & Mohren, G.M.J. (2007): The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia*, 25 (2), pp. 103–112.
232. Wittig, R. (2008): *Siedlungsvegetation*, Stuttgart: Ulmer. 252 pages.
233. Wittig, R., Kuttler, W. & Tackenberg, O. (2014): Urban-industrielle Lebensräume. In: V. Mosbrugger, G. Brasseur, M. Schaller, & B. Stribrny (eds.): *Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, pp. 290–307.
234. WMO (2016): *Climate Data and Data Related Products*, Available at:
235. http://www.wmo.int/pages/themes/climate/climate_data_and_products.php [Accessed March 10, 2016].
236. World Bank (2014): *World Development Indicators: Urbanization*, web page. Available at: <http://wdi.worldbank.org/table/3.12>.
237. Worrall, J.J., Adams, G.C. & Tharp, S.C. (2010): Summer heat and an epidemic of cytospora canker of *Alnus*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 32 (3), pp. 376–386.
238. Zapater, M., Bréda, N., Bonal, D., Pardonnet, S. & Granier, A. (2013): Differential response to soil drought among co-occurring broad-leaved tree

species growing in a 15- to 25-year-old mixed stand. *Annals of Forest Science*, 70 (1), pp. 31–39.