

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra hospodářské úpravy lesů



**Optimalizace mýtní těžby pro přírodě blízké
hospodaření na příkladu porostů Školního lesního
podniku Kostelec nad Černými lesy**

Diplomová práce

Autor: Bc. František Čepický

Vedoucí práce: prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. František Čepický

Lesní inženýrství

Lesní inženýrství

Název práce

Optimalizace mýtní těžby pro přírodě blízké hospodaření na příkladu porostů Školního lesního podniku Kostelec nad Černými lesy

Název anglicky

Final cut optimisation for close-to-nature forestry on example of forest stands of School Forest Enterprise Kostelec nad Černými lesy

Cíle práce

Cílem práce je vykonat rozbor a zhodnotit možnosti uplatnění optimalizačních metod v podmínkách plánování mýtní těžby při uplatňování přírodě blízkého hospodaření v ČR. Dílčím cílem bude odvození modelu optimalizace těžby pro skupinovou clonnou obnovu s dlouhou obnovní dobou, jeho aplikace ve vybraných porostech ŠLP Kostelec nad Černými lesy.

Metodika

Zpracování rešeršní části o optimalizačních metodách v hospodářsko-úpravnickém plánování, přírodě blízkém hospodaření a hospodářské úpravě obecně v ČR (květen – srpen 2021).

Odvození modelu optimalizace mýtní těžby pro skupinovou clonnou obnovu ve variantních řešeních – počet fází, velikost obnovních prvků a jejich umístění, délka obnovní doby apod. (květen – prosinec 2021).

Aplikace modelu ve vybraných porostech ŠLP Kostelec nad Černými lesy. Odvození výše mýtní těžby a jejího vývoje. Porovnání s klasickými způsoby odvození výše mýtní těžby (listopad 2021 – únor 2022).

Alternativní model pro optimalizaci produkční a další mimoprodukční funkce. Aplikace ve vybraných porostech ŠLP Kostelec nad Černými lesy (srpen 2021 – únor 2022).

Odvození závěru pro účely praktického hospodářsko-úpravnického plánování (leden – březen 2022)

Doporučený rozsah práce

50 stran

Klíčová slova

lineární programování, hospodářsko-úpravnickém plánování, těžební úprava lesa,

Doporučené zdroje informací

- BOSTON, K. – SIRY, J. P. – GREBNER, D. L. – BETTINGER, P. *Forest management and planning*. Amsterdam ; London: Academic, 2009. ISBN 978-0-12-374304-6.
- BUONGIORNO, J. – GILLESS, J. K. *Decision methods for forest resource managers*. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2003. ISBN 0121413608.
- DAVIS, L. S. *Forest management : to sustain ecological, economic, and social values*. Boston: McGraw Hill, 2005. ISBN 0-07-032694-0.
- GOVE, J.H – GANAPATI, P.P. – CHARLES, T. A mathematical programming model for maintaining structural diversity in uneven-aged forest stands with implications to other formulations. *Ecological Modelling*, 1995, 79:11-19
- O'HARA, K.L. What is close-to-nature silviculture in a changing world? *Forestry*, 2016, 89:1-6.
- PUKKALA, T. – LÄHDE, E. – LAIHO, O. Optimizing the structure and management of uneven-sized stands of Finland. *Forestry*, 2010, 83(2):129-142
- RÄMÖ, J. – TAHVONEN, O. Optimizing the harvest timing in continuous cover forestry. *Environ Resource Econ*, 2017, 67:853-868
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FLD

Vedoucí práce

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra hospodářské úpravy lesů

Elektronicky schváleno dne 1. 5. 2021

doc. Ing. Peter Surový, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 5. 2021

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 24. 06. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace mytní těžby pro přírodě blízké hospodaření na příkladu porostů Školního lesního podniku Kostelec nad Černými lesy vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Róberta Marušáka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Klatovech dne 7.4.2022

Bc. František Čepický

Mé poděkování patří vedoucímu této diplomové práce prof. Ing. Róbertu Marušákovi, PhD. za cenné rady, připomínky, poskytnuté materiály a pomoc po celou dobu vzniku této práce.

Abstrakt

Lesnictví prochází v posledních letech zásadními změnami s ohledem na změnu klimatu, kůrovcovou kalamitu a také změny požadavků společnosti. Těmto trendům by měla být přizpůsobena také hospodářská úprava lesů a způsoby plánování v lesnictví. Tato práce se zaměřuje na nové postupy při plánování mýtních těžeb, které zohledňují nejen produkční, ale také mimoprodukční faktory a berou v úvahu potřebu změny hospodaření s ohledem na dlouhodobou udržitelnost. Konkrétně byly vytvářeny modely metodou lineárního programování, které obsahovaly omezující podmínky zajišťující například specifické pěstební požadavky pro skupinově clonnou obnovu, vyrovnanost těžeb nebo ponechávání určitých částí porostu bez zásahu. Výsledkem práce jsou modely aplikované na data reálného porostu, které navrhnou způsob jeho obnovy skupinově clonnou sečí s dlouhou obnovní dobou. Bylo zjištěno, že při realizaci navržených postupů je možné dosáhnout tloušťkové struktury ve tvaru klesající „J“ křivky, což dává předpoklad pro vývoj porostu směrem k výběrnému lesu.

Klíčová slova

lineární programování, hospodářsko-úpravnické plánování, těžební úprava lesa

Abstract

Forestry has undergone fundamental changes in recent years with regard to climate change, bark beetle calamity and also changes in society's requirements. Forest management and planning practices in forestry should also be adapted to these trends. This work focuses on new methods of harvest planning, which take into account not only production but also non-production factors and take into account the need for change in management with regard to long-term sustainability. Specifically, models using the linear programming were developed. These models included restrictive conditions providing, for example, specific silviculture requirements for group shelterwood renewal of forest, balance of harvesting or leaving certain parts of the stand untouched. The result of the work are models applied to the data of the real stand, which propose a method of its renewal by group shelterwood cut with a long renewal time. It was found that in the implementation of the proposed procedures it is possible to achieve a diameter distribution in the shape of a reverse „J“ curve, which gives a precondition for the development of stand towards the selection forest.

Keywords

Linear programming, forest management planning, forest harvesting management

Obsah

1.	Úvod.....	13
2.	Cíle práce	14
3.	Rozbor problematiky	15
3.1	Hospodářská úprava lesů – vývoj a současný stav.....	15
3.2	Přírodě blízké hospodaření.....	17
3.3	Operační výzkum v lesnictví.....	19
3.3.1	Přístupy operačního výzkumu	19
3.3.2	Lineární programování v lesnictví	21
3.3.3	Těžební úprava z hlediska operačního výzkumu	22
3.3.4	Prostorové plánování	24
3.3.5	Podmínky ekosystémových služeb.....	26
3.3.6	Komplexní modely – optimalizační metody při přírodě blízkém hospodaření	29
4.	Metodika	32
4.1	Účelové funkce modelů.....	32
4.2	Tvorba prvků modelů	32
4.2.1	Proměnné modelu.....	32
4.2.2	Podmínky sousednosti.....	33
4.2.3	Podmínky neopakování těžby	34
4.2.4	Podmínky následnosti.....	35
4.2.5	Podmínky vyrovnanosti.....	37
4.2.6	Podmínky dokončení obnovy	39
4.3	Tvorba modelů	40
4.3.1	Model 1.....	40
4.3.2	Model 2.....	41

4.3.3	Model 3.....	41
4.3.4	Model 4.....	42
4.3.5	Model 5.....	42
4.3.6	Model 6.....	43
4.3.7	Model 510.....	43
4.4	Aplikace modelů na simulované porosty	45
4.5	Aplikace modelu na reálné porosty	46
5.	Výsledky	49
5.1	Modely bez aplikace na porostní data	49
5.1.1	Model 1.....	49
5.1.2	Model 2.....	50
5.1.3	Model 3.....	53
5.1.4	Model 4.....	54
5.2	Modely s aplikací na simulované porosty	58
5.2.1	Model 5.....	58
5.2.2	Model 6.....	64
5.3	Modely s aplikací na reálné porosty.....	68
5.3.1	Model 510.1.....	68
5.3.2	Model 510.2.....	72
6.	Diskuse.....	75
7.	Závěr	78
8.	Seznam literatury a použitých zdrojů	80
	Přílohy.....	84
	Příloha č. 1 – model 510.1	84

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – možné varianty řešení nerovnic 4.8 a 4.9	37
Tabulka 4.2 – údaje o porostu 510A10	46
Tabulka 4.3 - výměra obnovních prvků porostu 510A10	47
Tabulka 4.4 - vstupní data pro simulaci porostu 510A10	48

Seznam obrázků

Obrázek 4.1 - rozdělení porostu 510A10 na obnovní prvky.....	44
Obrázek 4.2 - výřez z porostní mapy se zájmovým porostem 510A10, měřítko 1:10 000.....	46
Obrázek 5.1 – grafické znázornění řešení Modelu 1	49
Obrázek 5.2 - legenda k obrázku 5.1	50
Obrázek 5.3 - Grafické zobrazení řešení Modelu 2.1	51
Obrázek 5.4 - Grafické zobrazení řešení Modelu 2.2	52
Obrázek 5.5 - legenda ke grafickému znázornění modelů.....	52
Obrázek 5.6 - schéma pořadových čísel obnovních prvků Modelů 2.....	52
Obrázek 5.7 - Grafické zobrazení řešení Modelu 3	54
Obrázek 5.8 - Grafické zobrazení řešení Modelu 4.1	55
Obrázek 5.9 - Grafické zobrazení řešení Modelu 4.2	56
Obrázek 5.10 – Grafické zobrazení řešení Modelu 4.3.....	56
Obrázek 5.11 – Legenda barevného znázornění zásahů	58
Obrázek 5.12 – Číslování obnovních prvků.....	58
Obrázek 5.13 – Grafické zobrazení řešení Modelu 5.1.....	60
Obrázek 5.14 - Grafické znázornění řešení Modelu 5.2	60
Obrázek 5.15 - Grafické znázornění řešení Modelu 5.3	61
Obrázek 5.16 – Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 5.1.....	63
Obrázek 5.17 - Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 5.2.....	64
Obrázek 5.18 – Grafické znázornění řešení Modelu 6.....	65
Obrázek 5.19 – Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 6.....	67
Obrázek 5.20 – grafické znázornění řešení Modelu 510.1	70
Obrázek 5.21 - Vývoj tloušťkové struktury porostu - Model 510.1	71
Obrázek 5.22 – grafické znázornění řešení Modelu 510.2	73
Obrázek 5.23 – Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 510.2.....	74

Seznam grafů

Graf 5.1 – těžba podle period Model 2.1	53
Graf 5.2 – těžba podle period Model 2.2	53
Graf 5.3 – těžba podle period Model 3	54
Graf 5.4 – těžba podle period Model 4.1	57
Graf 5.5 – těžba podle period Model 4.2	57
Graf 5.6 – těžba podle period Model 4.3	57
Graf 5.7 – Těžby podle period – Model 5.1	61
Graf 5.8 – Těžby podle period – Model 5.2	62
Graf 5.9 – Těžby podle period – Model 5.3	62
Graf 5.10 – Těžby podle period – Model 6	66
Graf 5.11 – těžby podle period – Model 510.1	69
Graf 5.12 - plocha zásahů podle period - Model 510.1	69
Graf 5.13 – těžby podle period – Model 510.2	72
Graf 5.14 – plocha zásahů podle period – Model 510.2	72

1. Úvod

Lesnictví v České republice prochází v posledních letech převratným obdobím souvisejícím s klimatickými změnami a kůrovcovou kalamitou, které podstatným způsobem mění naše lesy. V roce 2019 se poprvé v lesích vysadilo více listnatých než jehličnatých dřevin (Zpráva o stavu lesů a lesního hospodářství České republiky v roce 2019, 2020). Neopomenutelný tlak na lesní hospodářství je vyvíjen také ze strany široké veřejnosti. V 21. století jsou požadavky kladené společností na lesy zásadně odlišné od těch, které panovaly v době, kdy se lesnictví u nás formovalo. Vzhledem ke konzervatismu lesnictví je mnohdy obtížné přizpůsobit se efektivně novým trendům vývoje společnosti.

Mnozí vlastníci a správci lesů se dnes zaměřují na způsoby hospodaření, které jsou schopné lépe plnit služby, které od nich společnost požaduje, a především jsou schopny zajistit bezpečnější fungování hospodaření pod tlakem klimatické změny. Řeč je zejména o přírodě blízkých postupech hospodaření, které napodobují přírodní procesy a pracují s lesem jako s ekosystémem, což předpokládá větší odolnost a přizpůsobivost lesů. Tento trend proměn lesního hospodářství se musí odrážet ve všech jeho částech, hospodářskou úpravu lesa nevyjímaje. Ačkoliv prošla hospodářská úprava lesů od svého vzniku dlouhým vývojem, současné postupy nemusejí odpovídat požadavkům, které jsou na lesy kladeny. I když se do určité míry pracuje také například s přírodními podmínkami prostřednictvím hospodářských souborů, nejsou používané postupy schopné pracovat s mnohými faktory, které by měly být při plánování zohledněny. Například mýtní těžby jsou z podstaty legislativních předpisů plánovány pouze s ohledem na produkční ukazatele a navíc není zaručeno, že tyto ukazatele umožňují nalezení optimálního řešení.

Změny v oblasti lesního hospodářství uvedené výše vyžadují komplexní přístup k plánování, který bude schopen zahrnout veškeré požadavky a optimálně plánovat. Takový přístup by mohl být postaven na základě matematického programování, které se používá k optimalizaci plánování v různých oblastech lidské činnosti a také v oblasti lesnictví byly vytvořeny již mnohé postupy, a proto si tato práce si klade za cíl přispět k tomuto trendu vývoje rozbořem a tvorbou optimalizačních postupů zohledňujících více kritérií v podmínkách přírodě blízkého hospodářství.

2. Cíle práce

Cílem této práce je vykonat rozbor a zhodnotit možnosti uplatnění optimalizačních metod při plánování mytní těžby v podmínkách uplatňování přírodně blízkého hospodaření v České republice. Dílčím cílem je odvození modelu optimalizace těžby pro skupinovou clonnou obnovu s dlouhou obnovní dobou a jeho aplikace ve vybraných porostech Školního lesního podniku Kostelec nad Černými lesy.

3. Rozbor problematiky

3.1 Hospodářská úprava lesů – vývoj a současný stav

Vzniku vhodného přístupu k těžbě lesů obvykle předcházelo jejich plundrování do stavu, kdy nebyly buďto vůbec k dispozici, nebo byly jen v omezené míře. Tento přístup měl za následek formování vědomostí a znalostí o managementu lesa do podoby, jakou známe dnes. (Davis a kol., 2005)

Vznik a rozvoj hospodářské úpravy lesů je v evropských podmínkách spojen s kritickým stavem lesů a nedostatkem dříví v souvislosti s rozvojem společnosti v 18. století. Hlavním požadavkem společnosti byla nepřetržitá a vyrovnaná produkce a maximalizace ekonomického výnosu. Následkem toho bylo z vůle vlastníků zjišťováno zejména množství dříví a těžební možnosti, postupně se přidalo i dlouhodobější plánování. (Vašíček, 2018) Systematicky byla hospodářská úprava zaváděna po vzniku Československé republiky zákonem č. 82/1918 Sb., který udával, že: „*Majitelé lesů hospodařící na lesích dle pevných hospodářských plánů jsou povinni dále hospodařit podle těchto plánů.*“ Od tohoto období byly lesní hospodářské plány vyhotovovány stále ve větší míře a stále sofistikovanějšími metodami, v různých obdobích státními nebo soukromými subjekty. Tento přístup byl nepochybně úspěšný z produkčního hlediska, došlo k nárůstu plochy lesů, zásob i přírůstků, a tento trend trval až do nedávna (Zpráva o stavu lesů a lesního hospodářství České republiky v roce 2019, 2020). Byl narušen až v posledních letech kůrovcovou kalamitou. Hospodářská úprava lesů se proměnila v mnoha ohledech, například ve využívání různých technologií se dostala až k dnešním počítačovým metodám. Z původního zaměření na produkční funkci se postupně rozšířila pozornost i na ekologické a sociální funkce lesů (Vašíček, 2018).

Vyhláška č. 84/1996 Sb. o lesním hospodářském plánování ovšem uvádí, že se výše mýtní těžby pro lesy hospodářské a lesy zvláštního určení obhospodařované podrostním, násečným a holosečným hospodářským způsobem stanoví na základě ukazatelů těžební procento a normální paseka. Pro předmýtní těžby jsou pak v těchto lesích stanovena probírková procenta. Pro lesy obhospodařované hospodářským způsobem výběrným se stanovuje ukazatel celkové výše těžeb pomocí celkového běžného přírůstu. Ve všech těchto případech se vychází z údajů o zásobách, věku,

případně také druhu dřeviny a zakmenění. Jedná se tedy stále o produkční vlastnosti lesů a ekologické nebo sociální funkce nejsou těmito metodami brány v úvahu.

Pohled na management lesa, jakožto přírodního zdroje by ovšem neměl být omezený pouze jedním směrem. Boungiorno & Gilless (2003) dokonce uvádí, že hospodářská úprava lesů je uměním a vědou pracující s rozhodováním o využití, zachování a organizaci lesů a dalších zdrojů s nimi spojených. Toto rozhodování ovlivňuje jak dlouhodobý vývoj lesů, tak aktivity v denním měřítku. Kromě toho také platí, že úroveň řízení lesního hospodářství a souvisejících operací má významný dopad na navazující dřevozpracovatelské dodavatelské řetězce (D'Amours, 2017). Východiskem pro rozhodování jsou faktory jako například biogeografické vlastnosti prostředí, společenské požadavky nebo klima, které jsou neměnné. Z nich pak vyplývají záležitosti, které jsou již v kompetenci hospodáře, jako například volba dřevin, výchova a obnova lesních porostů. V moderní hospodářské úpravě lesů se tyto faktory promítají do konceptu udržitelného lesního hospodářství, který má za cíl vyvážení ekologických, ekonomických a sociálních funkcí lesa. (Duncker a kol., 2012) Také Zákon o lesích a o změně některých zákonů č. 298/1995 Sb. (lesní zákon) ve svém §1 definuje jako účel zákona zachování lesa a trvale udržitelné hospodaření v něm. I koncepce státní lesnické politiky do roku 2035 (2020) si stanovuje za cíl dosažení udržitelných multifunkčních lesů a lesního hospodářství, které odráží současné i očekávané potřeby společnosti.

Duncker a kol. (2012) definují na gradientu intenzity pět přístupů k managementu lesa: neobhospodařované přírodní lesní rezervace, přírodě blízké lesnictví, lesnictví kombinující různé cíle, intenzivní lesnictví ve stejnověkových lesích, lesnictví s krátkou dobou obmýtí. Intenzita hospodaření je sledována prostřednictvím několika různých faktorů, obecně lze říci, že na gradientu od neobhospodařovaných přírodních lesů k intenzivnímu hospodářství s krátkým obmýtím klesá využití přírodních vlivů, klesá schopnost plnit environmentální a sociální ekosystémové služby, roste míra využití mechanizace a chemických přípravků a systém hospodaření je více zaměřen na produkční funkci a racionalizaci práce. Je zřejmé, že přístupy na okrajích gradientu nemohou naplňovat výše zmíněné požadavky na hospodaření v lesích v 21. století, a proto je vhodné zaměřit se na přístupy, které jednak využívají přírodních principů a fungují v souladu s nimi a jednak také zabezpečují dostatečně produkční požadavky. Zajímavou možností je hospodaření kombinující různé cíle, které jsou maximalizovány na odlišných

částech lesů. Alternativou, která by mohla také vhodně plnit požadavky udržitelného hospodaření v lesích je přírodě blízké hospodaření, na které se zaměřuje tato práce.

3.2 Přírodě blízké hospodaření

Základním předpokladem hospodaření v lesích je myšlenka toho, že obhospodařované lesy poskytují více benefitů a ekosystémových služeb, než lesy neobhospodařované. S ohledem na tento fakt se vyvinuly různé přístupy hospodaření s různými pojmenováními, jako například holistické lesnictví, ekolesnictví, ekosystémové hospodaření, hospodaření se souvislým lesním krytem apod. (O'Hara, 2015). Tyto přístupy můžeme považovat za takzvaně přírodě blízké, jejich opakem pak jsou tzv. přírodě vzdálené homogenní monokulturní stejnověké lesy (Johann, 2006). V posledních letech se pozornost stále více upírá k přírodě blízkým způsobům hospodaření s ohledem na probíhající klimatickou změnu a v podmínkách České republiky také kůrovcovou kalamitu.

Definování toho, co to je přírodě blízké hospodaření, je poměrně subjektivní, odvíjí se od zájmu konkrétní skupiny lidí, která způsob hospodaření pojmenovává, od lokálních podmínek a kritérií, která jsou hodnocena (O'Hara, 2015). „Přírodě blízké“ znamená podobné přírodnímu stavu. Posuzuje se tedy vliv člověka a to, jak moc jsou lesy jeho působením odchýleny od přírodního (přirozeného) stavu (Duncker a kol., 2012). Významnou organizací prosazující přírodě blízké hospodaření v lesích je Pro Silva. Organizace zastává hospodářské principy jako například komplexní pohled na les, trvalý pokryv půdy lesem, zaměření na malé prostorové jednotky nebo využívání přirozené obnovy. Tyto principy napodobují přirozený vývoj lesa a v co největší míře využívají přírodní procesy. Používání těchto principů sleduje zachování lesních ekosystémů, ochranu půdy a klimatu, produkci dříví i ostatních produktů a v neposlední řadě také rekreační a sociální služby lesa. (Pro Silva, 2012) Hlavní myšlenkou přírodě blízkého hospodaření tedy je co největší napodobení přírodních procesů za současného zachování ekonomické efektivity v rámci ekologických funkcí ekosystému, což může vést ke snížení produktivity. (Duncker a kol., 2012) Může ale docházet také ke zlepšení porostních charakteristik. Zlepšení druhové a věkové struktury porostu může mít pozitivní dopad na zvýšení produktivity porostu, aniž by byly omezeny nedřevní funkce lesa (Banas, 2018). Napodobování přírodních procesů je ovšem velmi komplexní

záležitost a k uplatňování tohoto způsobu hospodaření jsou potřeba různé hospodářské strategie, které jsou proměnlivé v místě a čase (O'Hara, 2015).

Přírodě blízké hospodaření se zdá také jako vhodný způsob adaptace hospodářských lesů na změnu klimatu. Přírozená obnova zabezpečuje zachování genetické variability a přizpůsobení náletů stanovišti, různé obnovní postupy (jednotlivý výběr, skupinový výběr, podrovní obnova) zajišťují podmínky pro obnovu širokého spektra dřevin, což jsou předpoklady adaptace na měnící se klima. Existují ale i případy, které jsou běžné v přírodních lesích, ale v přírodě blízkém hospodaření se neuplatňují. Jedná se zejména o napodobení velkoplošného rozpadu holosečemi, což je typické spíše pro stejnověké monokulturní lesy. (Spathelf, 2015)

Podle organizace Pro Silva (2012) je pro udržitelnost hospodaření důležité kromě využívání produkční funkce lesů také zachování jejich ochranné funkce. Udržitelné hospodaření je možné pouze tehdy, pokud není tato ochranná funkce dotčena. Ochrannou funkcí lesů je v tomto případě myšleno zachování úrodnosti lesní půdy, udržení přírodních energetických a minerálních cyklů a kontinuita přírodního charakteru lesů a produkce dřeva. Jako prostředky k naplnění těchto myšlenek doporučuje Pro Silva konkrétní postupy a principy, které jsou charakteristické pro přírodě blízké hospodaření. Jedná se například o trvalý pokryv půdy lesním porostem, využívání přírodních procesů, aktivní výchova porostů, věnování pozornosti jednotlivým stromům nebo odklon od doby obmýetí jakožto veličiny určující, kdy má být porost vytěžen.

Z hlediska obnovních těžeb a obnovy porostů je pro přírodě blízké hospodaření charakteristický jednotlivý nebo skupinový výběr s dlouhou obnovní dobou. S tím přímo souvisí využití přírozené obnovy a autoredukčních procesů. Hlavními prvky managementu lesa by měly být výchovné a obnovní těžby, s využitím šetrných způsobů provedení zásahů a bez použití přípravků na ochranu rostlin. (ProSilva, 2012)

Z hlediska hospodářské úpravy je potřeba zohledňovat specifika přírodě blízkých způsobů hospodaření. Přírodě blízké lesy jsou mimo jiné obvykle také nestejnověké a vyskytuje se v nich velké množství různě starých stromů na relativně malé ploše, v takovém případě není optimální systém hospodářské úpravy lesů vyvinutý primárně pro stejnověké porosty. I když jsou dokonale nestejnověké porosty spíše výjimečné, často se vyskytují například malé skupiny stejně starých stromů, které jsou ale příliš malé na to,

aby mohly být řízeny jako stejnověké porosty větších výměr. (Boungiorno & Gilles, 2003)

Přírodě blízké způsoby hospodaření popsané výše zajišťují produkci kvalitního dříví, snížení nákladů na výchovu porostů využitím autoredukčních procesů a krytí mateřským porostem, snížení nákladů na obnovu díky přirozené obnově a omezení ztrát díky větší odolnosti porostů vůči abiotickým faktorům nebo případně snazší obnovu díky jejich vysoké resilienci. (Pro Silva, 2012)

Soulad přírodě blízkých postupů, ekologických a sociálních požadavků na lesy a jejich produkční funkce je nutné vhodně kombinovat v závislosti na podmínkách. Takovéto úlohy mohou být poměrně komplexní a jejich řešení nelze realizovat intuitivně, vhodným nástrojem jsou metody operačního výzkumu.

3.3 Operační výzkum v lesnictví

Lesnictví představuje zdroj suroviny pro velkou šíři produktů a zároveň také lesy zabezpečují řadu funkcí a služeb nezbytných pro společnost. Také lesnické činnosti v užším slova smyslu jsou poměrně široké od péče o stanoviště, přes zakládání a pěstování lesa až po jeho těžbu, k čemuž se přidružují aktivity jako budování cest, péče o vodní režim krajiny nebo například činnosti související s turistickou funkcí lesů. Do všech těchto činností se promítají specifika různých postupů napříč vlastnictvím lesů a schopnostmi a možnostmi subjektů vykonávajících tyto činnosti, přírodní podmínky a v neposlední řadě také legislativní omezení. Kombinace všech těchto aspektů vytváří širokou škálu rozhodovacích situací, které je potřeba efektivně řešit. K řešení takových situací se v lesnictví přibližně od 70. let 20. století využívají metody operačního výzkumu. (Rönnqvist a kol., 2015) Lesnictví je totiž z hlediska plánování specifický obor díky své komplexitě, různými cílům, které jsou často protichůdné, a dlouhým plánovacím obdobím.

3.3.1 Přístupy operačního výzkumu

Všeobecně platí, že velké množství jednotlivých složek určitého systému má tendenci směřovat k individuálnímu cíli na úkor cíle celého systému. Nejlepší řešení

z pohledu jedné složky je často nereálné z pohledu jiné složky systému, a proto je potřeba efektivně přiřadit jednotlivým složkám dostupné zdroje a nalézt optimální řešení pro systém jako celek. Výskyt takovýchto problémů ve společnosti měl za následek vznik operačního výzkumu. Jedná se o soubor metod sloužících k nalezení optimálního řešení. Postup řešení spočívá v definování problému a shromáždění potřebných dat, formulace matematického modelu reprezentujícího daný problém, počítačového řešení problému, jeho testování a zavedení do praxe. (Hillier & Lieberman, 2010)

Definování problému spočívá v identifikaci cílů, omezení a vztahů mezi složkami systému. Jedná se o zásadní krok, jelikož pouze správně definovaný model může poskytnout správné řešení. Po definování problému následuje formulace matematického modelu. Jedná se o idealizovanou reprezentaci skutečnosti vyjádřenou matematickým zápisem. Jeho smyslem je matematické popsání podstaty problému. Pokud se v rámci problému vyskytuje n rozhodovacích možností, pak do modelu vstupují ve formě proměnných definovaných jako x_1, x_2, \dots, x_n . Měřítkem výkonu (například celková výše těžeb) je matematická funkce (účelová funkce) tvořená těmito proměnnými, cílem řešení modelu je potom maximalizace nebo minimalizace této funkce. Pomocí proměnných se matematicky formulují také různá omezení formou rovnic a nerovnic. Takto formulovaný model je řešen obvykle pomocí softwaru s implementovaným algoritmem. (Hillier & Lieberman, 2010) Využití výpočetní techniky umožňuje řešení modelů obsahujících tisíce omezujících podmínek. K řešení je možné využít v zásadě dva přístupy – grafickou metodu a výpočetní postupy. Grafická metoda je použitelná jen u velmi jednoduchých problémů, u většiny problémů se používají výpočetní metody, z nichž nejčastější je simplexová metoda aplikovaná s pomocí výpočetní techniky. (Boungiorno & Gilless, 2003).

Existuje velké množství matematických modelů. Jedním z nejdůležitějších je lineární model, který je specifický tím, že jeho proměnné jsou vždy v lineárním tvaru. (Hillier & Lieberman, 2010) Lineární programování je metoda operačního výzkumu založená na lineárních modelech. Jedná se o velmi všeobecnou optimalizační metodu, která se nevyžívá zdaleka jen v lesnictví, ale také v mnoha dalších oborech. Podstata řešení problému vždy spočívá v optimálním využití zdrojů k různým aktivitám. Těmito zdroji jsou v lesnictví lidské síly, půda, stromy, čas nebo peníze. (Boungiorno & Gilless, 2003)

3.3.2 Lineární programování v lesnictví

Metody operačního výzkumu jsou v lesnictví aplikovány v mnoha různých případech. Řešeny jsou problémy logistické nebo záležitosti regulací a také různé kombinace problémů, ale většina aplikací se především v minulém století, kdy začaly být tyto metody využívány, týkala řízení těžby dříví. (Leuschner a kol., 1975) V posledních několika dekádách se pozornost významně obrátila k tématům jako je ochrana volně žijících organismů, kvalita vody a půdy, sekvestrace uhlíku nebo ochrana biodiverzity a všeobecná udržitelnost. V posledních letech vzrostla diverzita rozhodovacích situací a rozsah plánování kvůli většímu množství informací, které vede ke konstrukci větších modelů a kvůli novým omezením, která vedou k větší komplexitě omezujících podmínek. (Rönnqvist a kol., 2015)

Jako proměnné mohou být používány různé veličiny (plocha, množství vytěženého dříví, finanční vyjádření, ulovené kusy zvěře atd.), ovšem důležitá je možnost jejich kvantifikace a objektivního použití v modelu. Obvykle se optimalizuje jedna veličina a ostatní veličiny jsou zakomponovány v omezujících podmínkách. Vhodnou veličinou je produkce dříví, protože je obvykle provázána s ostatními veličinami, na které se bere v lesnictví ohled a je dobře kvantifikovatelná. (Leuschner a kol., 1975)

Na provozní úrovni jsou řešena rozhodnutí týkající se těžby, dopravy dříví z lesa k odběratelům, efektivní distribuce sortimentů k uspokojení odlišných poptávek, lokalizace mechanizace a budování těžebních linek nebo případně i odvozních cest. Důležité je také implementovat metody operačního výzkumu na celý dodavatelský řetězec, což ale naráží na problémy vyplývající z podstaty lesního hospodářství jako je růst stromů, kalamity nebo nejistota budoucích cen. Jedná se tedy o určitou komplexní výzvu, jelikož je potřeba uvažovat kromě produkčního hlediska také environmentální a sociální specifika. (Rönnqvist a kol., 2015) Epstein a kol. (2007) popisují případ aplikace postupů operačního výzkumu v širším rozsahu na lesnické subjekty v Chile, které hospodaří na plantážích velkých rozloh a jsou integrovány s navazujícím zpracovatelským průmyslem. V oblastech plánování kamionové dopravy, krátkodobého plánování těžby, přístupových cest, umístění těžebních prostředků a také střednědobého a dlouhodobého lesnického plánování byly aplikovány postupy lineárního programování a heuristických metod. Podařilo se díky tomu vylepšit hospodaření firem a úspory z toho

plynouce byly odhadovány ve výši kolem 20 milionů dolarů ročně (tržby těchto firem byly kolem 1 miliardy dolarů ročně).

3.3.3 Těžební úprava z hlediska operačního výzkumu

Na rozhodovací proces v oblasti těžby je možné pohlížet na operativní, taktické i strategické úrovni. K úspěšnému komplexnímu řízení je potřeba integrovat operativní, taktickou i strategickou úroveň rozhodování kvůli rozsahu problémů, velkému počtu vyráběných produktů, dodavatelů prací, odběratelů výrobků a velkému časovému rozpětí. Strategická rozhodnutí ovlivňují navazující taktická rozhodnutí a ta potom ovlivňují rozhodnutí i na operační úrovni. Zejména v lesnictví je taková integrace poměrně náročná, protože strategická úroveň plánování pracuje v řádech i stovek let, zatímco operační rozhodnutí se mohou realizovat v řádech sekund (např. při kácení a manipulaci stromu víceoperačním strojem). (D'Amours a kol., 2008)

Na operační úrovni se jedná o všechny operace týkající se těžby dříví jako takové počínaje pokácením stromu po jeho dopravu odběratelům. (Rönnqvist a kol., 2015) Zatímco všeobecně jsou operační rozhodnutí velmi krátkodobá, v lesnictví mohou trvat v rámci týdnů i měsíců. Řešeny mohou být otázky jako například: které těžební jednotky by měly být vytěženy v daném období, jaká by měla být použita mechanizace, jaké by se měly vyrábět sortimenty, jaké je potřeba budovat přístupové cesty apod. (Epstein a kol., 2007) Například Papps a Manley (1992) vyvinuli model lineárního programování spojující krátkodobá operační rozhodnutí s dlouhodobějším plánováním.

Přechodem od operativního rozhodování ke strategickému je taktické (střednědobé) rozhodování, které by mělo zajistit, aby byla rozhodnutí stanovená při strategickém plánování přenesena na operativní úroveň. (D'Amours a kol., 2008) Na taktické úrovni se v lesnictví řeší roční plány, plánovacím horizontem je tedy rok a periodou, na kterou se plánuje, jsou měsíce nebo týdny. (Rönnqvist a kol., 2015) Na této rozhodovací úrovni mohou být řešeny operace širšího měřítka. Základním problémem je například identifikace porostů odpovídajících specifikům poptávky svými vlastnostmi, k čemuž lze také používat lineární programování. Dalším příkladem může být například plánování výstavby přístupových cest z hlediska jejich trasování a načasování výstavby nebo volba porostů k těžbě pro každý rok v rámci několikaletých intervalů. (Martell a kol., 1998)

Strategické (dlouhodobé) plánování je v mnoha ohledech podstatou tradičního lesního hospodářství, která má v Evropě počátek v regulaci toku surového dříví v 19. století. Strategické plánování se vyvinulo až do současné podoby, kdy je zaměřeno na komplexní udržitelnost. (Martell a kol., 1998) Strategické modely v lesnictví se zaměřují na interakce mezi hospodářskými rozhodnutími, jako je těžba a pěstební opatření, a tématy jako je udržitelnost a ekonomická návratnost. (Gunn, 2007) Zvláště v lesnictví a navazujícím průmyslu je strategické měřítko dlouhodobé, protože obmýti obvykle neklesá pod 80 let, pily jsou budovány a inovovány s výhledem na následujících 30 let a více. Rozhodnutí tedy směřují k tvorbě strategií obhospodařování lesa, ochraně přírody, budování komunikací nebo otevírání pilařských závodů. (D'Amours a kol., 2008) Lesní hospodářské plány (LHP) jsou navrženy tak, aby maximalizovaly výši těžeb, která by měla být udržitelná a pokud možno také konstantní. Lesníci tak stojí před výzvou, jak ovlivňováním přírodních procesů za jejich současného zachování uspokojit poptávku po dříví a také mnohých nedřevních produktech a službách. To vše pod tlakem různých zájmových skupin a legislativy. Úkolem tedy někdy může být nalezení možného realizovatelného řešení, spíše než optimálního řešení. (Martell a kol., 1998) Jedná se v podstatě také o optimální řešení ale za daných podmínek.

Strategické plánování se běžně týká prostorových jednotek na rozlohách až několika stovek tisíc hektarů a v časovém rozsahu až století. V nejjednodušším případě je obvykle cílem maximalizace čisté současné hodnoty dříví při dodržení podmínek udržitelnosti a konkrétního přístupu k hospodaření (Martell a kol., 1998), ale lesnictvím dnes významně ve všech směrech prostupuje téma udržitelného hospodaření s rostoucím důrazem na management ekosystému a klesajícím důrazem na dříví. (Gunn, 2007) Plánování se odehrává jak na úrovni státu, tak na úrovni vlastníků, respektive správců lesa. (Rönnqvist a kol., 2015) Jedná se o oblast, kde mohou být nejlépe využity metody operačního výzkumu a jejich uplatnění má největší efekt. (Martell a kol., 1998)

Lineární programování má v této oblasti relativně dlouhou historii, ale využívány mohou být i jiné metody, například různé simulační modely (Rönnqvist a kol., 2015), které jsou kromě modelů lineárního programování druhou skupinou modelů používanou v oblasti managementu lesa. (Gunn, 2007) První strategický model lineárního programování byl vytvořen v druhé polovině 20. století a týkal se dlouhodobého plánování těžeb. (Navon, 1971) Gunn (2007) uvádí, že modely lineárního programování v lesnictví mají tři odlišné části. První část modeluje růst a management lesa, druhá

udržitelnost produkce a třetí modeluje implicitně nebo explicitně definované využití stanoviště spojené s jeho specifickými vlastnostmi.

Existují dva základní přístupy modelování růstu a managementu lesa označované jako Model I. a Model II. Model I. předpokládá, že za dané období mohou být obnoveny všechny obnovní prvky, Model II. připouští i některé prvky bez obnovy. (Johnson & Scheurman, 1977) Někteří autoři uvádějí ještě Model III., který seskupuje všechny porosty z jedné věkové třídy, v každé periodě se daná věková třída těží nebo netěží a přechází do starší věkové třídy. (Gunn, 2007)

Gunn (2007) uvádí, že modely modelující management lesa formulací Modelu I mají obvykle následující strukturu:

Maximalizovat:
(minimalizovat)

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{P_i} C_{ik} x_{ik} \quad (3.1)$$

Za podmíněk:

$$\sum_{k=1}^{P_i} x_{ik} = A_i ; i = 1 \text{ až } I \quad (3.2)$$

, kde x_{ik} jsou proměnné modelu, hodnotě k odpovídá určitá výměra z celkové oblasti I . Hodnoty C_{ik} představují čistou současnou hodnotu budoucích výnosů plochy i o stanovené výměře k . A_i je celková výměra analyzované plochy i . Hodnoty C_{ik} mohou představovat také pouze celkový objem dříví produkovaného na i -té ploše o výměře k . Formulace Modelu I je tedy popisována jako velmi jednoduchá a může být tedy nahrazována Modelem II nebo Modelem III, což obvykle znamená podstatné snížení počtu proměnných, ale za cenu tvorby dalších komplikovanějších podmínek. Konkrétní podmínky pak odpovídají potřebám a charakteru daného modelu.

3.3.4 Prostorové plánování

Zvyšující se tlak na zmenšení velikostí holosečí, udržování netěžených pásů podél komunikací a chráněných lokalit a snahy o zachování přírodních habitatů vedly všeobecně k potřebě hodnocení prostorových aspektů těžby dříví. Prostorové aspekty

jsou v modelech vyjádřeny obvykle pomocí podmínek sousednosti, které stanovují například, že některé těžební prvky mohou být vytěženy s určitým časovým odstupem. Výsledné vzory pak tvoří jakousi šachovnici prostorových prvků, které mohou být těženy během konkrétního období. Jedním z nejčastějších způsobů zakomponování prostorových aspektů do rozhodovacího procesu jsou prostorové podmínky v modelu lineárního programování. (Martell a kol., 1998) Problémem tedy je kde, ale také kdy těžít. Kromě toho prostorové plánování zahrnuje také například plánování výstavby cest. (Rönnqvist a kol., 2015)

Pro účely prostorového plánování těžeb se lesní celky dělí na obnovní prvky. Prostřednictvím omezujících podmínek se poté popisují vztahy mezi těmito obnovními prvky, konkrétně mluvíme o tzv. podmínkách sousednosti. Podmínky sousednosti lze posuzovat podle tří odlišných přístupů. Prvním je tzv. Neumannovo okolí, kdy se za sousední považují obnovní prvky sdílející se zájmovým obnovním prvkem pouze hrany. Další možností je tzv. Mooreovo okolí, kdy se kromě hran berou v úvahu i rohy okolních obnovních prvků. (Konoshima a kol., 2011) Třetí alternativou je vymezení sousedních obnovních prvků konkrétní vzdáleností od zájmového prvku, což je ale poněkud komplikovanější než předchozí dva případy (Bettinger a kol., 2009)

V modelech upravujících prostorové vztahy se obvykle používají následující rozhodovací proměnné:

$$x_{it} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

V těchto binárních hodnotách 1 vyjadřuje těžbu obnovního prvku i v periodě t a 0 nastává v ostatních případech. (Murray, 1999)

Murray (1999) uvádí dva základní typy modelů prostorového plánování mýtních těžeb: URM (unit restriction model) a ARM (area restriction model). URM model pracuje s obnovními prvky jako s nedělitelnými jednotkami a specifická je pro něj následující podmínka sousednosti.

$$x_{ip} + x_{jp} \leq 1 \quad \forall i, p, j \in N_i \quad (3.4)$$

V tomto vztahu jsou i a j sousední obnovní prvky, které, jestliže proměnná x nabývá binárních hodnot, nemohou být vytěženy v periodě p oba najednou. Při sestavování

modelu podle tohoto principu se identifikují všechny sousední obnovní prvky j k obnovnímu prvku i a sestaví se pro ně příslušné omezující podmínky. (Murray (1999))

Alternativou je ARM model, který je v podstatě stejný, jako URM model, kromě podmínky 3.4.

$$f_{ip}(x) \leq A \forall i, p \quad (3.5)$$

Tato podmínka vyjadřuje pomocí funkce f celkovou plochu všech sousedních prvků i vytěžených v periodě p , která nesmí být větší než stanovená plocha A . (Murray, 1999) V podmínkách České republiky jsou ale při prostorovém plánování těžeb použitelné pouze URM modely, jelikož zákonná omezení určují kromě velikosti holé seče také její tvar. (Kašpar & Marušák, 2020)

V obou typech modelů je účelová funkce shodná (rovnice 3.6), maximalizuje se výše těžeb nebo hodnota vytěženého dříví. (Murray, 1999)

Maximalizovat:

$$Z = \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P C_{ip} x_{ip} \quad (3.6)$$

Zároveň ale proti maximalizaci těžby působí kromě jiných podmínek, jak bude popsáno dále, také uvedené základní podmínky sousednosti. Kromě udržitelnosti hospodaření je v případě holoseči také předpoklad environmentální. Má se za to, že čím je vytěžená souvislá plocha menší, tím je menší i dopad tohoto zásahu na lesní prostředí. Příliš malé plochy ale naopak vedou k poklesu potenciálního profitu kvůli větší náročnosti práce. (Rönnqvist a kol., 2015) Z tohoto vyplývá jasná potřeba hledání optimálního řešení.

Prostorové problémy se stávají podstatně komplexnějšími, když se zohledňují i další faktory, jako například ochrana přírodních stanovišť nebo opatření související s chovem zvěře. (Martell a kol., 1998)

3.3.5 Podmínky ekosystémových služeb

Environmentální problémy jsou v lesním hospodářství zohledňovány v podstatě při každém plánování a omezují plánování až už plošně jako zákonná omezení vstupující i do základních prostorových podmínek uvedených v kapitole 3.3.4., tak také jako

konkrétní specifické záležitosti řešené na úrovni daného lesního majetku. Epstein a kol. (2007) uvádí, že rozhodnutí zohledňující environmentální aspekty musí být v souladu s těžebními rozhodnutími na taktické úrovni, kde je stanovena širší oblast k těžbě. V tomto případě jsou zmiňovány problémy jako nevyužívání těžké techniky na náchylných půdách nebo budování cest s cílem omezením eroze. Tato environmentální omezení jsou obvykle dána biologickou rozmanitostí, velikostí, tvarem a rozložením těžebních jednotek a lesních porostů. (Kašpar a kol., 2015)

V lesním hospodářství byly modely lineárního programování využity nejprve k přidělení pozemků k účelům produkce dříví a k účelům ochrany přírody. Později byly vyvinuty také binární modely lineárního programování řešící, zda dané lokality zahrnovat do ochranných aktivit nebo ne. (Rönnqvist a kol., 2015)

Omezující podmínky charakterizující vztahy a problémy z hlediska prostředí se nazývají obvykle habitatové podmínky, podmínky lesního pokryvu nebo například krajinné podmínky. Jejich formulaci podle Gunna (2007) zobrazuje následující rovnice.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^{P_i} w_{iksdt} x_{ik} \geq W_{sdt} \quad (3.7)$$

$$s = 1, S; d = 1, D_s; t = 1, T$$

V tomto případě je w_{iksdt} hodnota stavu stanoviště měřená pro typ stanoviště s v oblasti d v periodě t , pokud je předpis k použit pro analyzovanou plochu i . W_{sdt} je spodní limit na stupnici měření stavu stanoviště, S je počet zájmových stanovišť, D_s je počet oblastí s výskytem habitatu s . Z tohoto je zřejmé, že existuje značná variabilita v definici typů stanovišť a ve specifikaci oblastí. Oblastmi mohou být například povodí a podmínky mohou být zaměřeny na lesní pokryv těchto povodí. Gunn (2007)

K řešení problémů prostorového plánování těžeb s ohledem na environmentální omezení existuje více přístupů. Korosuo a kol. (2014) k tomu využívají prostorové indexy a pracují na principu omezení fragmentace zájmových stanovišť. Thompson a kol. (1973) navrhli model lineárního programování maximalizující výši těžeb, který omezoval velikost holosečí a zahrnoval také různé varianty ochrany přírody se kterými pracoval prostřednictvím nákladů na tuto ochranu vynaložených. Kašpar a kol. (2015) používají k zahrnutí environmentálních podmínek techniky multikriteriálního a celočíselného programování. Presentovaný model obsahuje účelové funkce zajišťující maximalizaci

těžeb, minimalizaci obvodu přestárých částí porostů ponechaných bez těžby a minimalizaci množství dříví v porostech bez těžby. Jako prvek zajišťující environmentální funkce jsou ponechávány porosty bez zásahu, model v tomto případě pracuje s obvodem těchto částí, jelikož se snaží zachovat jejich co největší celistvost. Zároveň se ale z ekonomického hlediska snaží o minimalizaci objemu dříví v těchto porostech bez zásahu. Jednotlivé účelové funkce jsou agregovány do jedné maximalizační funkce a jsou jim přiřazeny určité váhy. Jednotlivé váhy byly v uvedeném článku rozlišovány ve čtyřech variantách hospodaření podle orientace na produkci, objem nevytěženého dříví, obvod netěžených prvků a také neutrální varianta.

Požadavek ponechání porostů bez zásahu je autory v modelu matematického programování definován podmínkou 3.8.

$$\sum_{i=1}^I r_i y_{ip} \geq \lambda R, \forall p = 1, \dots, P \quad (3.8)$$

Podíl porostů ponechaných bez zásahu vyjadřuje koeficient λ jako procento z celkové plochy lesního majetku R . V uvedené podmínce je r_i výměra obnovního prvku i a y_{ip} je binární proměnná nabývající hodnot 1, když obnovní prvek i není těžen v periodě p a 0 v ostatních případech. P představuje počet desetiletých těžebních period.

Cestou k plnění environmentálních funkcí lesů může být kromě ponechávání vhodných habitatů také přírodě bližší hospodaření. Marušák & Kašpar (2015) prezentují model plánování pro podrostní hospodářský způsob – obnovu maloplošnou dvoufázovou clonnou sečí. Kromě toho jsou v modelu implementovány i podmínky ponechávání některých obnovních prvků bez zásahu. Výsledky ukazují, že celková těžba může být vyšší v případě podrostního hospodářského způsobu, jelikož holosečný hospodářský způsob je více ovlivňován zákonnými limity. Konoshima a kol. (2011) představili model plánující těžby v podrostním systému hospodaření se dvěma nebo třemi clonnými sečemi. V tomto modelu jsou podmínky sousednosti definovány tak, že $x_{i,j}$ nabývá hodnoty 1, pokud je proveden j -tý zásah na i -tém obnovním prvku a 0 v ostatních případech. Tento přístup vyžaduje také ošetření možnosti provedení pouze jednoho zásahu v dané periodě na daném obnovním prvku.

Výsledná výše těžeb je obvykle významně ovlivněna podmínkami sousednosti a dalšími prostorovými omezeními a tím pádem zůstávají často některé obnovní prvky bez

zásahu. Kašpar a kol. (2015) předpokládali, že s ohledem na tento fakt i ponechání prvků bez obnovy s environmentálním účelem nebude mít na celkovou výši těžeb vliv, což se ovšem nepotvrdilo. Každopádně může být pomocí matematického programování dosaženo určitého kompromisu mezi těžebními a environmentálními možnostmi. Tyto faktory jsou doplňovány o další podmínky a jsou tak vytvářeny modely pojímající hospodaření ve vyšší komplexitě.

3.3.6 Komplexní modely – optimalizační metody při přírodě blízkém hospodaření

Udržení vitálních a produktivních lesů vyžaduje komplexní management, který obsahuje jak prostorové, tak environmentální otázky. Obě oblasti jsou důležité, protože těžební aktivita může vést ke zhoršení kvality půdy, vodohospodářských schopností lesa nebo například poškození estetiky lesa. Těžba je ale samozřejmě prostředkem k ekonomické funkčnosti lesního hospodářství a přispívá také například k ochraně před přemnožením škůdců nebo v některých oblastech omezuje riziko vzniku lesních požárů.

V matematických modelech plánování těžeb se objevují kromě výše zmíněných i další podmínky upravující další specifika plánování. Například Gove a kol. (1995) se zabývali tvorbou modelu zajišťujícího variabilitu porostu z hlediska tloušťkové struktury a druhového složení. Podstatou modelu byla sada omezujících podmínek zajišťující, že vnitřní diverzita stanoviště (reprezentovaná tloušťkovou strukturou) byla v následujícím období větší nebo minimálně stejná jako v počátečním období. Účelovou funkcí byla maximalizace očekávané budoucí hodnoty optimálního porostu, omezující podmínky byly následující:

$$N_j(t) - N_j(t - 1) \geq 0; j = 1, \dots, s + 1 \quad (3.9)$$

$$BPA = PSL \quad (3.10)$$

$$N_j(t - 1) \geq 0; j = 1, \dots, s \quad (3.11)$$

V uvedených podmínkách je s počet tloušťkových tříd, $N_j(t-1)$ počet stromů v tloušťkové třídě j na počátku pětileté periody, $N_j(t)$ počet stromů v tloušťkové třídě j na konci pětileté periody, BPA celková kruhová základna na plochu v optimálním porostu a PSL určitá konkrétní kruhová základna. Tento přístup tedy zahrnuje diverzitu porostu do komplexnějšího modelu, ale mohou existovat i přístupy, které diverzitu přímo maximalizují.

Pukkala a kol. (2010) optimalizovali tloušťkovou strukturu různověkých porostů po obnově během obnovní doby 20 let v borových a smrkových porostech. Výsledná tloušťková struktura porostu měla tvar obrácené „J“ křivky a všechny mylně zralé stromy byly vytěženy. Tento přístup managementu různověkých porostů se ve většině případů ukázal jako více profitabilní než pěstování stejnověkých porostů. Model byl zaměřen na čistou současnou hodnotu příjmů z porostu řízeného daným způsobem hospodaření, jejíž výpočet uvádí rovnice 3.12.

$$NPV_t = \frac{N_T}{(1+i)^T - 1} - C_T \quad (3.12)$$

V této rovnici je N_T čistý příjem získaný v T letých intervalech, C_T je hodnota počáteční investice a i je úroková míra. Maximalizována pak je účelová funkce uvedená v rovnici 3.13, která je rozdílem mezi čistou současnou hodnotou a tzv. penaltovou funkcí. Tato penaltová funkce (viz rovnice 3.14) zajišťuje udržitelnost, mimo jiné tím, že frekvence každé tloušťkové třídy musí být na konci periody minimálně stejná jako na počátku. V této funkci jsou f'_i a f_i frekvence stromů v jednotlivých tloušťkových třídách na konci a na začátku těžební periody, n je počet tloušťkových stupňů a proměnná i zajišťuje větší penalizaci nedostatku velkých stromů oproti malým stromům.

$$OF = NPV - penalty \quad (3.13)$$

$$Penalty = \sum_{i=1}^n (|f'_i - f_i| * i * 200) \quad (3.14)$$

Posledním typem podmínek obvykle zařazovaných do komplexních modelů jsou podmínky zajišťující vyrovnanou výši těžeb v jednotlivých periodách. Jak definují tyto podmínky například Öhman a Wikström (2008) uvádí rovnice 3.15 a 3.16. Zde je x_{ij}

binární proměnná nabývající hodnoty 1, pokud je prováděn na prvku i zásah j . V_{ijp} je objem těžby na obnovním prvku i při zásahu j v periodě p . P je počet period, I je počet obnovních prvků a J_i je počet plánovaných zásahů pro obnovní prvek i . Koeficienty α a β vyjadřují maximální pokles a nárůst objemu těžeb mezi dvěma následujícími periodami.

$$(1 - \alpha) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} V_{ijp} X_{ij} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} V_{ij(p+1)} X_{ij} \quad (3.15)$$

$$(1 + \beta) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} V_{ijp} X_{ij} \geq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} V_{ij(p+1)} X_{ij} \quad (3.16)$$

$$p = 1, \dots, P - 1$$

Do modelů plánování těžeb může být zahrnuto velké množství dalších problémů a řešení zohledňující mnohé požadavky na lesní hospodaření. Předpokladem úspěšné adaptace na měnící se podmínky, ať už sociální nebo environmentální atd., je komplexní plánování zohledňující vlivy působící na lesy a lesní hospodářství. Na principech nastíněných v teoretické části je formulována praktická část této práce.

4. Metodika

Metodika práce byla zaměřena na tvorbu a aplikaci modelů lineárního programování a je rozdělena do tří základních částí. První částí byla tvorba všeobecně platných podmínek lineárního programování podle výše popsanych principů s ohledem na přírodě blízké postupy hospodaření a jejich sestavení do modelů. V další části byly teoretické modely aplikovány na počítačově simulované porosty a ve třetí části byly aplikovány na data reálných porostů.

4.1 Účelové funkce modelů

Účelová funkce modelů je v této práci zaměřena na maximalizaci hodnoty získané realizací těžebních zásahů na daných obnovních prvcích. Tato hodnota je představována hodnotou c v rovnici 4.1 a v této práci je to výše vytěženého dříví na obnovním prvku i v periodě p při provedení určitého zásahu (x, y, z, \dots). Hodnoty proměnných (pro model o třech zásazích se jedná o proměnné x_{ip}, y_{ip}, z_{ip}) nabývající hodnot 0, pokud je obnovní prvek bez zásahu, a 1, pokud je proveden zásah, jsou násobeny hodnotami c a účelová funkce je kompletní sumarizací v rámci všech obnovních prvků a všech period, ve kterých je prováděna obnova porostu, jak uvádí rovnice 4.1. Pro model pracující s pěti zásahy je účelová funkce sestavena podle stejného principu s přidáním dalších proměnných.

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^P c_{ipx} x_{ip} + \sum_{i=1}^N \sum_{p=2}^P c_{ipy} y_{ip} + \sum_{i=1}^N \sum_{p=3}^P c_{ipz} z_{ip} \quad (4.1)$$

4.2 Tvorba prvků modelů

4.2.1 Proměnné modelu

Základním východiskem pro tvorbu modelů je v této práci identifikace jednotlivých obnovních prvků a jejich označení. Předpokladem sestavení modelu je unikátní označení jednotlivých obnovních prvků nejen v rámci jejich celkového počtu, ale i napříč jednotlivými periodami, ve kterých se předpokládá zásah na daných

obnovních prvcích. Tato označení pak představují jednotlivé proměnné modelu lineárního programování. Z principů přírodně blízkého hospodaření bylo odvozeno, že je potřeba na jednotlivých obnovních prvcích uplatnit více po sobě jdoucích zásahů v různém čase, a proto označení obnovních prvků vychází z označení písmenem, které vyjadřuje, o jaký zásah v pořadí se jedná. Pracováno je s variantou tří nebo pěti zásahů na obnovním prvku, a proto bylo použito označení x , y , z pro první, druhý a třetí zásah v případě tří zásahů a u , v , x , y , z pro první až pátý zásah v případě varianty používající pět zásahů. Dalším prvkem v označení je pořadové číslo obnovního prvku a dále pak číslo periody. Jediným fixním prvkem je tedy pořadové číslo, které identifikuje daný prvek napříč všemi periodami u každého zásahu. Označení písmenem se pro daný obnovní prvek mění, podle toho, jaký je na něm prováděn zásah, a stejně tak se mění i číslo periody. Například označení $x12$ znamená první zásah na prvním obnovním prvku v druhé periodě v případě modelu pracujícím se třemi zásahy nebo označení $z216$ znamená třetí zásah na 21. prvku v šesté periodě v případě modelu se třemi zásahy.

4.2.2 Podmínky sousednosti

Jak bylo popsáno výše, jedněmi ze základních podmínek v modelech lineárního programování řešících prostorové plánování těžeb jsou podmínky sousednosti. Tyto podmínky jsou v případě této práce definovány na principu URM modelu a jednotlivé proměnné v nich nabývají hodnot 0 a 1, jak je uvedeno v rovnici 3.3. Předpokladem pro tvorbu těchto podmínek je fakt, že nemohou být těženy dva sousední obnovní prvky v jedné periodě. Následkem tohoto omezení se pak předpokládá, že dojde k zásahu na různých místech porostu v dané periodě a na sousedním obnovním prvku bude zásah proveden nejdříve až v následující periodě, k čemuž se vážou další podmínky. Následkem aplikace těchto podmínek se předpokládá diferenciací zásahů v porostu a s tím související vznik prostorově i věkově diferencovaného nově vznikajícího porostu. Pro identifikaci sousedních prvků je v této práci použit přístup Mooreova okolí, který sice není tak přesný jako vymezení sousedních prvků na základě vzdálenosti od zájmového prvku, ale přesto umožňuje identifikovat dostatečný prostor okolo daného obnovního prvku v podobě sousedních obnovních prvků. Nevylučuje se ani individuální upravení podmínek podle prostorových specifik daného porostu. Podmínky sousednosti jsou definovány podle rovnice 4.2, přičemž označení x odpovídá prvnímu zásahu a pro další

zásahy je zaměňováno za příslušné písmeno tak, jak bylo popsáno výše. V rovnici 4.2 $j \in J$, kde J je množina všech sousedních prvků k prvku i , a $p \in P$, kde P je množina všech period, ve kterých jsou prováděny zásahy.

$$x_{ip} + x_{jp} \leq 1 \quad \forall i, p, j \quad (4.2)$$

Ve chvíli, kdy $x_{ip} = 1$, pak $x_{jp} = 0$, což znamená, že na obnovním prvku x_{ip} je proveden zásah a na všech sousedních obnovních prvcích zásah v dané periodě neprobíhá.

4.2.3 Podmínky neopakování těžby

Při tvorbě modelu je nutné omezující podmínkou zajistit, aby byl každý zásah proveden pouze jednou. Ačkoliv v reálném použití to je samozřejmé, v matematickém zápisu by bez tohoto omezení došlo k tomu, že by mohl být zásah opakován. První zásah na obnovním prvku i v případě tří zásahů je vyjádřen proměnnými $x_{ip} \dots x_{ip+n}$, kde n je počet period následujících po periodě p . Všechny tyto proměnné tedy při hodnotě 1 znamenají provedení prvního zásahu na obnovním prvku i , ale v různých periodách. Jelikož je ale možné první zásah provést pouze jednou, je nutné, aby byl součet všech těchto proměnných menší nebo roven 1, což zajišťuje podmínka 4.3.

$$x_{ip} + x_{ip+1} + \dots + x_{ip+n} \leq 1 \quad (4.3)$$

Stejným způsobem se stanovují podmínky také pro druhé a třetí zásahy, s tím rozdílem, že druhý zásah se provádí nejdříve až po provedení prvního zásahu, což může nastat nejdříve ve druhé periodě. Z tohoto důvodu lze stanovit také provedení třetího zásahu nejdříve na třetí periodu atd. Tento fakt zachycují podmínky 4.4 a 4.5.

$$y_{ip+1} + y_{ip+2} + \dots + y_{ip+n} \leq 1 \quad (4.4)$$

$$z_{ip+2} + z_{ip+3} + \dots + y_{ip+n} \leq 1 \quad (4.5)$$

Pro model o více zásazích je stanovení podmínek neopakování těžby prováděno stejným způsobem. Vždy platí, že n -tý zásah je prováděn nejdříve v periodě n , přičemž označení

zásahu písmenem může být různé. Perioda, ve které je možné naposledy provést první zásah ale není limitována počtem period a je možné ho uskutečnit i v poslední periodě, pokud to není v rozporu s jinými podmínkami. Všechny ostatní zásahy jsou ve svém provedení podmíněny realizací prvního zásahu, což zajišťují tzv. podmínky následnosti.

4.2.4 Podmínky následnosti

Smyslem podmínek následnosti je zajištění logického pořadí provedení zásahů. Podmínky zajišťují, aby se druhý zásah prováděl po prvním atd., což není v prostředí formulace modelu samozřejmé a je to potřeba těmito podmínkami ošetřit. V této práci jsou používány dvě varianty podmínek následnosti. První varianta (pro účely této práce nazvána podmínky následnosti prvního typu) zajišťuje že je následující zásah proveden hned v periodě následující po provedení prvního zásahu, druhá varianta (podmínky následnosti druhého typu) umožňuje provedení následujícího zásahu v první nebo druhé periodě po provedení předchozího zásahu.

První varianta podmínek následnosti je podstatně jednodušší a její formulaci vyjadřuje rovnice 4.6. Ve chvíli, kdy $x_{ip} = 1$, pak se také $y_{ip+1} = 1$ a je tedy zajištěno, že při provedení zásahu x_{ip} je v následující periodě proveden i zásah y_{ip+1} . Pokud není proveden zásah x_{ip} , nemůže být proveden ani zásah y_{ip+1} . Pro následné provedení třetího zásahu je použita podmínka 4.7, která funguje stejně, jako podmínka 4.6, a nepřímo zajišťuje návaznost zásahu z_{ip+2} na zásah x_{ip} . Obdobným způsobem se postupuje při tvorbě podmínek pro případný větší počet zásahů, mění se pouze periody odpovídající počtu zásahů a označení zásahů písmenem. Tato formulace podmínek následnosti tedy znamená, že je-li proveden první zásah, budou provedeny i další zásahy hned v následujících periodách. V podstatě se jedná o formulaci vztahu $x_{ip} = y_{ip+1}$ převedenou do anulovaného tvaru.

$$x_{ip} - y_{ip+1} = 0 \quad (4.6)$$

$$y_{ip+1} - z_{ip+2} = 0 \quad (4.7)$$

Druhá varianta umožňuje podstatně větší časovou variabilitu provedení zásahů ve srovnání v první variantou podmínek následnosti, s čímž ale souvisí složitější formulace a větší komplexita. Fakt, že je druhý zásah proveden v první nebo druhé periodě po provedení prvního zásahu a třetí zásah proveden ve druhé nebo třetí periodě po prvním zásahu atd., je ošetřen sadou dvou podmínek, které nejsou funkční individuálně, ale pouze při aplikaci obou najednou. Tyto podmínky jsou vyjádřeny nerovnicemi 4.8 a 4.9.

$$x_{ip} - y_{ip+1} - y_{ip+2} \leq 0 \quad (4.8)$$

$$x_{ip-1} + x_{ip} - y_{ip+1} \geq 0 \quad (4.9)$$

Při formulaci tohoto požadavku nebylo možné vycházet z předpokladu $x_{ip} = y_{ip+1} + y_{ip+2}$ po vzoru první varianty podmínky následnosti. Tato formulace by totiž znemožňovala provedení zásahu y_{ip+1} v reakci na potenciální předchozí zásah x_{ip-1} a umožňovala by provedení tohoto zásahu pouze v návaznosti na zásah x_{ip} , což by ale znamenalo, že nelze dosáhnout požadavku realizace druhého zásahu až v druhé periodě po prvním zásahu s vynecháním jedné periody. Možné varianty řešení nerovnic 4.8 a 4.9 zobrazuje tabulka 4.1. Nerovnice 4.8 umožňuje provedení druhého zásahu (y) aniž by byl proveden zásah x_{ip} (řešení 1 a 2), to pak znamená, že v nerovnici 4.9 bude $x_{ip-1} = 1$ (řešení 1), pokud $y_{ip+1} = 1$. V případě, že $y_{ip+2} = 1$, uplatní se také nerovnice 4.9, ovšem až ve formulaci odpovídající další periodě. V takovém případě bude nerovnice 4.9 vypadat takto: $x_{ip} + x_{ip+1} - y_{ip+2} \geq 0$ a nastává tedy případ řešení 4. V případě řešení 3 jsou také splněny obě podmínky v uvedeném tvaru ale podstata realizace zásahu y_{ip+2} vychází opět také z nerovnice 4.9 ve tvaru o periodu později, jak je uvedeno v předchozí větě. Řešení 2 je zabezpečeno kompletně podmínkami 4.8 a 4.9 v uvedených tvarech a jedná se tedy v podstatě o stejné řešení, jako v případě 4, ovšem v jiném čase. Stejně tak také řešení 1 a 3 jsou časovými obdobami.

Tabulka 4.1 – možné varianty řešení nerovnic 4.8 a 4.9

	x_{ip-1}	x_{ip}	x_{ip+1}	y_{ip+1}	y_{ip+2}
1	1	0	0	1	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	0	0	1
4	0	0	1	0	1

Z uvedených potenciálních řešení je patrné, že uvedené podmínky 4.8 a 4.9 fungují neoddělitelně a je nutná také provázanost v čase neboli platnost podmínek ve variantách pro následující, respektive předchozí periody, jelikož jednotlivé proměnné se vyskytují nejen ve dvou uvedených podmínkách, ale i v jejich časových variantách. Pro funkčnost těchto podmínek jsou nezbytné také podmínky neopakování těžby uvedené v rovnicích 4.3 až 4.5.

Podmínky jsou stejně tvořeny také pro vztah druhého (y) a třetího (z) zásahu, jak zobrazují nerovnice 4.10 a 4.11. Tím se přenáší nepřímou skutečnost provedení prvního zásahu (x) i na třetí zásah (z). Obdobným způsobem lze tvořit podmínky pro případný vyšší počet zásahů.

$$y_{ip+1} - z_{ip+2} - z_{ip+3} \leq 0 \quad (4.10)$$

$$y_{ip} + y_{ip+1} - z_{ip+2} \geq 0 \quad (4.11)$$

Tyto podmínky pak vnášejí určitou časovou variabilitu do obnovy porostu ve srovnání s první variantou podmínek následnosti a umožňují diferenciaci a s tím související uplatnění přírodních procesů.

4.2.5 Podmínky vyrovnanosti

Podmínky vyrovnanosti mají za cíl zajistit relativně vyrovnané výše těžeb mezi jednotlivými periodami. Podstata tohoto záměru vychází z teorie normálního lesa a myšlenky dlouhodobě udržitelného hospodaření i z ekonomického hlediska. Formulace tohoto záměru je provedena pomocí jedné rovnice a čtyřech nerovnic. V modelu

lineárního programování je nejprve nutné zjistit výši těžby v dané periodě, což zajišťuje rovnice 4.12.

$$\sum_{i=1}^N c_{ipx}x_{ip} + \sum_{i=1}^N c_{ipy}y_{ip} + \sum_{i=1}^N c_{ipz}z_{ip} - T_p = 0 \quad (4.12)$$

V této rovnici je c_{ipx} potenciální výše hodnoty získané provedením zásahu x na obnovním prvku i v periodě p . Tato hodnota může být zejména objem dříví vytěženého při zásahu v m^3 nebo například čistá současná hodnota výnosů ze dříví vytěženého při tomto zásahu. Tyto hodnoty jsou shodné s hodnotami v účelové funkci. Obdobné jsou také hodnoty pro další zásahy. Hodnota T_p potom vyjadřuje celkovou výši těžeb v periodě p a následně vstupuje do podmínky 4.13 a do podmínky 4.14, které zajišťují, že výše zájmové hodnoty v periodě T_{p+1} bude v určitém rozpětí od výše hodnoty v periodě T_p .

$$(1 - A) * T_p - T_{p+1} \leq 0 \quad (4.13)$$

$$(1 + A) * T_p - T_{p+1} \geq 0 \quad (4.14)$$

Hodnota $A \in \langle 0; 1 \rangle$, pokud $A=1$, tak je výše získané hodnoty T_{p+1} (např. těžby) minimálně 0 a maximálně až dvojnásobná oproti T_p . V případě, že se $A=0$, je $T_{p+1} = T_p$. Hodnota A je tedy manuálně volena podle požadavků na míru vyrovnanosti a možností realizace modelu v rozsahu uvedeného intervalu.

Jelikož může při řešení modelu vznikat tendence neustálého navyšování výše těžby s každou další periodou i přes uplatnění podmínek vyrovnanosti, je soustava těchto podmínek doplněna ještě o podmínky 4.15 a 4.16. Tyto dvě podmínky zajišťují vzájemný vztah mezi výši těžeb v první a poslední periodě a omezují tak riziko posouvání výše těžby stále na nejvyšší možnou hranici v každé další periodě při použití samotných podmínek 4.13 a 4.14 a z toho plynoucí nevyrovnanost. Při takto formulované soustavě podmínek lze tedy předpokládat největší nevyrovnanost pouze mezi první, respektive poslední periodou, a periodami uprostřed obnovní doby, která by ale neměla být tak výrazná, jako v případě použití pouze podmínek 4.13 a 4.14. Tuto nerovnost je ale poměrně snadné upravit vhodným nastavením hodnoty A , která nemusí být u všech

podmínek stejná, ale může se libovolně měnit. Hodnoty v nerovnicích 4.15 a 4.16 jsou jinak stejné povahy, jako hodnoty v nerovnicích 4.13 a 4.14.

$$(1 - A) * T_1 - T_{p+n} \leq 0 \quad (4.15)$$

$$(1 + A) * T_1 - T_{p+n} \geq 0 \quad (4.16)$$

4.2.6 Podmínky dokončení obnovy

Fakt, že musí proběhnout obnova na všech obnovních prvcích během definovaných period, ošetřuje podmínka 4.17. Jedná se o součet všech proměnných pro daný zásah na všech prvcích v rámci všech period, který je roven celkovému počtu obnovních prvků (n). Alternativní variantou může být také to, že je tento součet menší, než počet obnovních prvků, což znamená, že některé obnovní prvky zůstanou bez zásahu. To může být použito například při požadavku na ponechání určité části porostu bez těžby z důvodů ochrany přírody, např. zachování starých stromů pro druhy na ně vázané, ponechání určité části porostu k dožití a samovolnému rozpadu apod. Levá strana rovnice může být také menší nebo rovna určitému počtu obnovních prvků, čímž se dává možnost ponechání většího množství obnovních prvků bez zásahu, a stejně tak i větší nebo rovna určitému počtu, což umožňuje vytěžení všech obnovních prvků ale dovoluje i ponechání některých bez zásahu. Rovnice 4.17 uvádí podmínku pro zásah x , obdobně je podmínka formulována i pro všechny ostatní zásahy. Při této formulaci je možné, aby byl počet posledních zásahů menší než počet předchozích zásahů, což by znamenalo, že na obnovním prvku budou provedeny např. dva zásahy, kterými bude zakmenění sníženo na 3, a dotěžení prvku už neproběhne a bude ponechán pouze menší počet stromů na vybraných prvcích. Každý další zásah může být podle tohoto principu realizován na menším počtu prvků než předchozí, ale nikoliv naopak, protože to by nedávalo smysl z hlediska podmínek následnosti.

$$\sum_{i=1}^N x_{ip} = n \quad (4.17)$$

Alternativní variantou, jak formulovat podmínky dokončení obnovy je formulace uvedená v rovnici 4.18, která sumarizuje všechny zásahy v jedné podmínce. Její případné

varianty jsou obdobné jako v předchozím případě. Při každé formulaci, která dovoluje těžbu méně než všech obnovních prvků, se ale může stát například to, že nebudou realizovány pouze poslední zásahy, ale i to, že na některých prvcích nebude realizován žádný zásah. Tyto možnosti není možné v této formě podmínky přímo kontrolovat. Rovnice 4.18 udává podmínku pro tři zásahy, stejným způsobem se sestaví i podmínky pro libovolný počet dalších zásahů, s tím, že n se násobí počtem zásahů.

$$\sum_{i=1}^N x_{ip} + \sum_{i=1}^N y_{ip} + \sum_{i=1}^N z_{ip} = 3 * n \quad (4.18)$$

4.3 Tvorba modelů

Tvorba modelů byla prováděna na základě výše uvedených podmínek. Nejprve byly sestavovány jednoduché modely a postupně byly přidávány další podmínky na základě zjištěných poznatků. Modely byly vytvářeny nejprve pouze jako teoretické bez jakéhokoli reálného základu a až později byly aplikovány na simulovaná nebo reálná data. K řešení všech modelů byl využíván optimalizační software Gurobi. Jako vstup do softwaru sloužil model lineárního programování v souboru typu .lp, který se skládá ze tří textově zapsaných částí: účelové funkce, omezujících podmínek a seznamu proměnných. Výstupem optimalizace je soubor .sol, který vypisuje řešení pro jednotlivé proměnné.

4.3.1 Model 1

První model byl vytvořen pro teoretický čtvercový porost skládající se ze 16 čtvercových obnovních prvků. Model byl navržen na tři zásahy a pět period. Účelová funkce tohoto modelu odpovídá rovnici 4.1. Byly náhodně vygenerované hodnoty zásob obnovních prvků od 10 m^3 do 30 m^3 a jako hodnoty c byly v účelové funkci použity hodnoty vycházející ze zásob. Tyto hodnoty odpovídaly jednotlivým zásahům tak, aby první zásah znamenal snížení zakmenění z 8 na 5, druhý zásah z 5 na 3 a třetí zásah ze 3 na 0 (dotěžení prostu). Nebyl uvažován přírůstek, a proto hodnoty c zůstávají stejné ve všech periodách.

V modelu byly použity podmínky sousednosti, následnosti a neopakování těžby. Podmínky sousednosti byly stanoveny tak, jak uvádí kapitola 4.2.2 na základě vizuálního posouzení vztahů obnovních prvků ve vytvořeném schématickém zobrazení. Podmínky následnosti byly vytvořeny jednodušším způsobem, který uvádí rovnice 4.6 a 4.7. Podmínky neopakování těžby odpovídají popisu v kapitole 4.2.3.

4.3.2 Model 2

Tento model byl navržen pro teoretický čtvercový porost se čtvercovými obnovními prvky, kterých bylo celkem 49 (7×7). Uvažováno bylo 6 period a tři zásahy (dvakrát snížení zakmenění a poté dotěžení obnovního prvku). Účelová funkce byla stanovena stejně, jako v případě Modelu 1. Použity byly standardní podmínky sousednosti, podmínky následnosti prvního typu (podmínky 4.6 a 4.7) a podmínky neopakování těžby. Dále byly implementovány také podmínky vyrovnanosti s hodnotou $A = 0,45$ a podmínky dokončení obnovy. Model byl proveden ve dvou variantách, varianta Model 2.1 obsahuje podmínky dokončení obnovy podle rovnice 4.17, přičemž $n = 46$ (ponechání tří obnovních prvků bez zásahu), a varianta Model 2.2 obsahuje podmínku dokončení obnovy podle rovnice 4.18, kde je také $n = 46$. V obou variantách se tedy předpokládá, že bude provedeno o 9 zásahů méně, než je maximum.

4.3.3 Model 3

Model 3 byl sestaven pro 49 obnovních prvků, 6 period a 3 zásahy, stejně jako Model 2. Účelová funkce tohoto modelu byla oproti předchozímu změněna, za hodnoty c byly dosazeny hodnoty odrážející fiktivní přírůst. Tento přírůst byl nastaven jako procentuální nárůst potenciální výše těžeb o 15 % za periodu. V tomto případě se jedná pouze o teoretické použití za účelem zjištění vlastností modelu, a ačkoliv bývá perioda zásahů v lesnictví obvykle například pět nebo deset let a přírůst by v takovém případě nedával smysl, v tomto případě není délka trvání periody ani výše přírůstu podstatná, jelikož je použita za účelem zjištění funkčnosti podmínek. Dále byly v modelu použity podmínky sousednosti, následnosti a neopakování těžeb stejné jako v předchozím modelu. Podmínky vyrovnanosti byly použity s hodnotou $A = 0,7$, jelikož nižší hodnota neumožňovala realizaci modelu s ohledem na použití přírůstu. Podmínky dokončení

obnovy byly formulovány první variantou (rovnice 4.17) a hodnota $n = 43$ pro všechny zásahy, což znamená ponechání 6 obnovních prvků kompletně bez zásahu.

4.3.4 Model 4

Tento model byl sestaven stejně jako předchozí pro 49 obnovních prvků, 6 period a 3 zásahy. Byly použity standartní podmínky sousednosti a podmínky neopakování těžby, jako v předchozích modelech. Podmínky následnosti byly v tomto modelu sestaveny podle rovnic 4.8 až 4.11 (podmínky následnosti druhého typu). Vyhотовeny byly tři varianty modelu, které se lišily v přírůstu a podmínkách vyrovnanosti. Model 4.1 obsahoval přírůst představovaný hodnotou c v účelové funkci na úrovni 3 % a neobsahoval podmínky vyrovnanosti. Model 4.2 taktéž neobsahoval podmínky vyrovnanosti a experimentální přírůst byl 15 %. V modelu 4.3 byly podmínky vyrovnanosti použity s hodnotou $A = 0,7$ a přírůst na úrovni 15 %. Podmínky dokončení obnovy byly v tomto modelu vynechány ve všech třech variantách (použity jen pro zjištění výše těžeb), jelikož byl model zaměřen především na aplikaci podmínek následnosti druhého typu a posouzení vlivu přírůstu.

4.3.5 Model 5

Tento model byl obdobně jako předchozí sestaven pro 49 obnovních prvků, ale poprvé zde bylo použito 5 potenciálních zásahů pro obnovení každého obnovního prvku, které představovaly postupné snižování zakmenění z 1 na 0 po 0,2. Podmínky byly formulovány totožně jako pro modely se třemi proměnnými, pouze adekvátně rozšířené o dvě proměnné. Označení proměnných bylo v tomto případě u, v, x, y, z od prvního do pátého zásahu, což znamená, že význam jednotlivých písmen je jiný než u předchozích modelů. Model byl navržen pro 6 period.

Odlišností oproti předchozím je také použití simulovaného přírůstu a simulovaných hodnot potenciálních těžeb na místě hodnot c v účelové funkci a v některých podmínkách. Tyto hodnoty byly stanoveny pomocí simulací v programu Sibyla, jak bude popsáno dále v kapitole 4.4.

Model byl zpracován ve třech variantách. Varianty Model 5.1 a Model 5.2 obsahovaly standardní účelovou funkci, podmínky sousednosti, podmínky následnosti druhého typu, a podmínky neopakování těžby. Podmínky vyrovnanosti byly použity pouze pro zjištění celkové výše těžeb v dané periodě, a proto nebyly zahrnuty nerovnice 4.13 a 4.14. Odlišnost těchto modelů spočívala pouze v hodnotách c v účelové funkci, jak bude popsáno dále. Varianta Model 5.3 neobsahovala podmínky sousednosti, ale pouze podmínky následnosti druhého typu, podmínky neopakování těžby a podmínky vyrovnanosti s hodnotou $A = 0,7$. Specifikem bylo v tomto případě upravení podmínek vyrovnanosti vynecháním podmínek 4.15 a 4.16, které znemožňovaly nalezení řešení.

4.3.6 Model 6

Tento model byl poslední teoretický model, který vycházel z postupných úprav v předchozích modelech a je tedy nejobsáhlejší, i když některé podmínky uvedené v předchozích modelech v něm nejsou zahrnuty. Stejně, jako Model 5 byl i tento navržen pro 49 obnovních prvků a pět zásahů. Vzhledem k požadavku na dokončení obnovy porostu byl zpracován pro 8 period. Hodnoty potenciální výše těžeb byly simulovány jako v předchozím modelu.

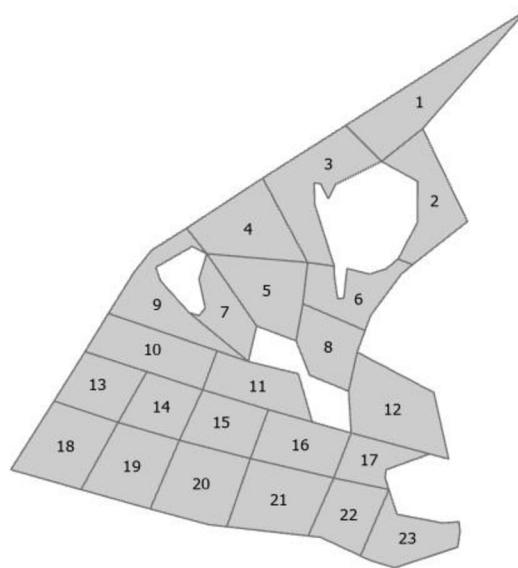
Byly použity podmínky sousednosti, podmínky následnosti druhého typu, podmínky neopakování těžby a podmínka dokončení obnovy podle rovnice 4.18 upravené pro 5 zásahů. Podmínky vyrovnanosti byly použity pouze za účelem zjištění výše těžeb v jednotlivých periodách, jelikož druhá část podmínek vyrovnanosti (nerovnice 4.13 až 4.16) neumožňovala nalezení řešení ani při použití úpravy aplikované v Modelu 5.3.

4.3.7 Model 510

Tento model byl vytvořen za účelem aplikace na reálný porost a navržení obnovy tohoto porostu. Model vycházel z předchozích poznatků při tvorbě modelů. Do účelové funkce byly vkládány hodnoty zjištěné simulací na podkladech reálných dat, jak bude popsáno dále. Navržen byl na obnovní dobu 80 let a 5 zásahů. Model v základu obsahoval podmínky následnosti prvního typu, jelikož podmínky druhého typu by znamenaly zásadní komplikaci při simulaci porostů. Obsažena byla také podmínka dokončení

obnovy podle rovnice 4.18. Model byl navržen ve dvou variantách, obě varianty obsahovaly výše uvedené podmínky. Varianta Model 510.1 byla navržena pro skupinovitě clonnou obnovu, a proto obsahovala podmínky sousednosti definované na základě reálných vztahů obnovních prvků, které byly vytvořeny v programu ArcGis. Tyto obnovní prvky zobrazuje obrázek 4.1 spolu s uvedením pořadových čísel obnovních prvků. Podmínky vyrovnanosti byly použity pouze ke zjištění výše těžeb v jednotlivých periodách, jelikož část reprezentovaná nerovnicemi 4.13 a 4.14 znemožňovala nalezení řešení i při hodnotě $A = 0,7$.

Varianta Model 510.2 umožňovala velkoplošnou clonnou obnovu, a proto byly podmínky sousednosti vynechány. V omezené míře byly použity podmínky vyrovnanosti, ačkoliv byla použita i část představovaná nerovnicí 4.13 a 4.14, byla použita pouze pro periody 4 až 8 a hodnota $A = 0,5$. Při zahrnutí dřívějších period nebylo možné nalézt řešení ani při hodnotě $A = 0,9$, jelikož s ohledem na vstupní údaje o porostu byly v prvních periodách podstatně nižší těžby, jak bude popsáno dále.



Obrázek 4.1 - rozdělení porostu 510A10 na obnovní prvky

4.4 Aplikace modelů na simulované porosty

První jednodušší modely nebyly aplikovány na simulované porosty. Simulace byla provedena pro modely 5 a 6. K simulacím byl použit simulátor biodynamiky lesa Sibyla (Sibyla Triquetra, 2022), který umožňuje provádění simulací různých variant probírkových zásahů (Fabrika & Ďurský, 2005). V tomto simulátoru byly nastaveny výchozí hodnoty simulovaného porostu, které byly záměrně co nejjednodušší: dřevina SM, zastoupení 100 %, střední tloušťka 25 cm, střední výška 30 m, zásoba 450 m³/ha, stupeň variability tloušťky 2, plocha simulovaného porostu 0,5 ha.

V modulu kultivátor programu Sibyla byly následně nastavovány zásahy podle scénářů, které by mohly při řešení modelu nastat. Ačkoliv byly i v modelech, pro které byly dělány simulace, používány podmínky následnosti druhého typu, nebylo s těmito variantami pracováno při simulacích. Při simulaci scénářů zohledňujících tyto podmínky by se počet potřebných simulací extrémně zvýšil a model by musel být konstruován jinak. Potenciální výše těžby na daném obnovním prvku v dané periodě by mohla být odlišná podle toho, jak se na obnovním prvku zasahovalo v předchozích periodách. Výše těžby pro daný obnovní prvek v dané periodě by mohla nabývat tolika variant, kolik různých scénářů vývoje a zásahů by mohlo předtím na daném obnovním prvku nastat. K projevení podmínek došlo pouze v Modelu 5.3, který byl ovšem specifický vynecháním podmínek sousednosti. Simulovány tedy byly scénáře zohledňující započetí obnovy porostu v kterékoliv periodě. Pro každý model bylo provedeno tolik simulací, pro kolik period byl navržen. Z programu Sibyla byla následně exportována data, která byla dále zpracovávána v MS Excel. Zjišťovány byly výše těžeb při konkrétních zásazích, které byly následně přiřazovány příslušným proměnným. Pro aplikaci v modelu bylo uvažováno s velikostí jednotlivých obnovních prvků 10 arů a úměrně tomu byly výše těžeb přepočteny. Pro všechny proměnné odpovídající danému zásahu v dané periodě byly použity stejné hodnoty výše těžeb. To znamená že neexistovala variabilita zásoby v porostu. Hodnoty výše těžeb byly následně použity v účelových funkcích a podmínkách modelů.

Zásahy byly navrhovány formou neutrální probírky snižováním zakmenění jednotlivými zásahy po 0,2. Pro model 5.1 byl vývoj navržen s délkou period po 5 letech (obnovní doba 30 let), pro Model 5.2 byla délka period 10 let (obnovní doba 60 let) a pro Model 6 také 10 let (obnovní doba 80 let).

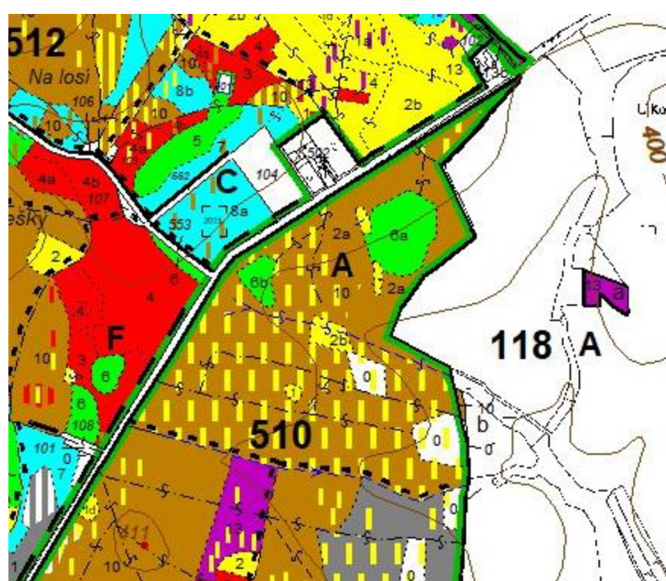
Po provedení simulací a zanesení hodnot výše těžeb do modelu byl model řešen standardně programem Gurobi jako předchozí modely a na základě výsledku byly vytvářeny tloušťkové struktury celého porostu. Tyto tloušťkové struktury odpovídaly sumarizaci tloušťkových struktur jednotlivých obnovních prvků náležejících určitému scénáři vývoje obnovního prvku. Pokud bylo s těžbou obnovního prvku započato například v první periodě a v páté periodě byla obnova dokončena, tloušťková struktura se vyvíjela odlišně od prvku, kde bylo započato s obnovou ve třetí periodě a dokončena byla v sedmé periodě.

4.5 Aplikace modelu na reálné porosty

Pro aplikaci modelů na reálná data byl vybrán porost 510A10 obhospodařovaný Školním lesním podnikem v Kostelci nad Černými lesy. Údaje o tomto porostu převzaté z LHP uvádí tabulka 4.2, obrázek 4.2 zobrazuje výřez z porostní mapy.

Tabulka 4.2 – údaje o porostu 510A10

Věk	Zakmenění	Obmýti	Obnovní doba	Dřevina	Zastoupení (%)	Výčetní tloušťka (cm)	Střední výška (m)	Zásoba (m ³ b.k.)	
								na 1 ha	celkem
98	8	90	40	SM	45	36	31	236	2792
				BO	30	40	30	123	1445
				MD	15	42	32	73	861
				DB	8	38	26	24	285
				JD	1	40	30	5	63
				JS	1	36	29	3	33



Obrázek 4.2 - výřez z porostní mapy se zájmovým porostem 510A10, měřítko 1:10 000

Dále byl použit mapový podklad v podobě obrysu porostní skupiny ve formátu .shp, který sloužil jako základ pro vytvoření obnovních prvků. Celková plocha porostu 510A10 je podle LHP 11,68 ha. Obnovní prvky byly vytvářeny manuálně s ohledem na tvar porostu, průběh linek atd. Průměrná plocha obnovního prvku byla 0,51 ha, nejmenší obnovní prvek byl 0,3 ha a největší 0,71 ha. Vytvořené obnovní prvky s uvedenými výměrami jsou zobrazeny na obrázku 4.1, výměru jednotlivých obnovních prvků uvádí tabulka 4.3. Vzhledem k délce periody, která byla 10 let a obnovní době 80 let bylo provedeno 8 simulací odpovídajících osmi různým možným scénářům vývoje porostu na jednotlivých obnovních prvcích.

Tabulka 4.3 - výměra obnovních prvků porostu 510A10

Obnovní prvek	Výměra (ha)
1	0,66
2	0,53
3	0,71
4	0,61
5	0,56
6	0,43
7	0,34
8	0,41
9	0,57
10	0,56
11	0,45
12	0,71
13	0,41
14	0,38
15	0,42
16	0,47
17	0,30
18	0,59
19	0,51
20	0,62
21	0,61
22	0,40
23	0,43
celkem	11,68

Na základě vstupních dat z LHP byl simulován porost v simulátoru Sibyla. Vzhledem k nízkému zastoupení některých dřevin byly tyto dřeviny sloučeny s jinými (JS s DB, JD se SM), jelikož by při přepočtení na simulovanou plochu vycházel nereálně nízký podíl daných dřevin. Do simulace vstupovala data uvedená v tabulce 4.4. Následně byly provedeny simulace postupem obdobným jako v kapitole 4.4. Zásahy byly navrhovány shodně pro všechny dřeviny, ale bylo by možné diferencovat je případně podle specifických vlastností jednotlivých dřevin. Vzhledem k tomu, že neměl porost při

vstupu do simulace plné zakmenění, byly první zásahy menší, což se projevilo i ve výsledném řešení modelu.

Tabulka 4.4 - vstupní data pro simulaci porostu 510A10

Dřevina	Zastoupení (%)	Výčetní tloušťka (cm)	Střední výška (m)	Zásoba (m ³ b.k./ha)
SM	46	36	31	241
BO	30	40	30	123
MD	15	42	32	73
DB	9	26	38	27

Výsledky simulací byly sumarizovány a byla zjišťována potenciální výše těžeb při jednotlivých potenciálních zásazích. Vzhledem k tomu, že byl simulovaný porost velký 0,5 ha, byly zjištěné výše těžeb na základě plochy přepočteny pro jednotlivé obnovní prvky a přiřazeny jednotlivým proměnným jednak v účelové funkci a jednak také v podmínkách vyrovnanosti v modelu. Z uvedeného vyplývá, že bylo pro zjednodušení uvažováno, že smíšení dřevin i variabilita zásoby je po ploše porostu konstantní, jelikož z LHP nejsou k dispozici bližší informace. Informace o rozmístění dřevin a variabilitě zásoby by vyžadovaly podrobnější šetření v porostu a vedlo by to k výraznému zpřesnění řešení. Po tomto kroku mohl být model řešen programem Gurobi.

Výsledky řešení obou variant modelu byly zakresleny do schématického zobrazení a byly zjištěny výsledné tloušťkové struktury. Pro zjištění tloušťkových struktur byly použity tloušťkové struktury z dat ze simulací. Pro každou periodu byla zjištěna celková plocha obnovních prvků připadajících určitému scénáři (v určitém stádiu obnovy porostu) a těmito hodnotami poté byly násobeny jednotlivé tloušťkové struktury. Sumarizací uvedených výsledků byly získány tloušťkové struktury porostu v jednotlivých periodách.

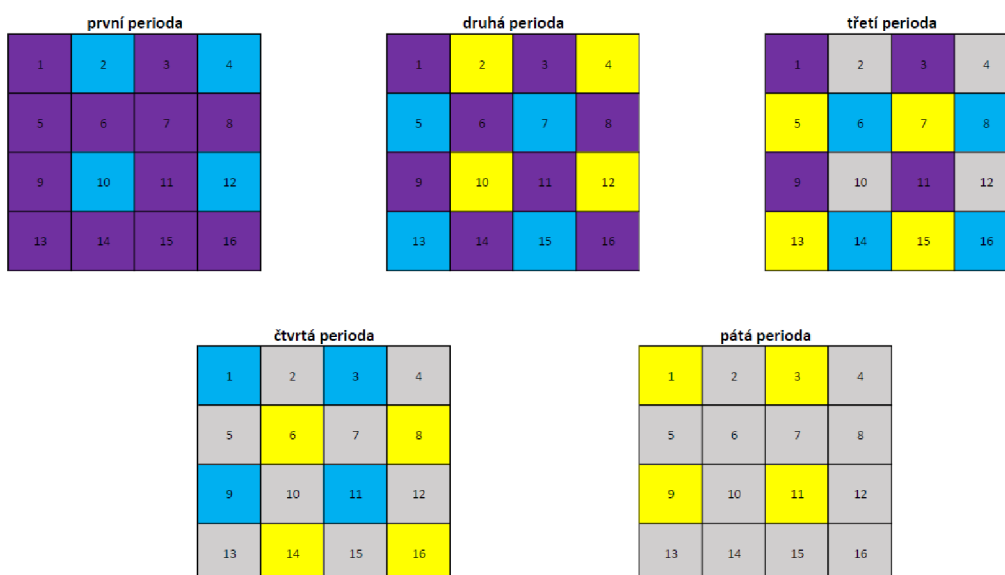
5. Výsledky

Výsledkem modelů po jejich vyřešení softwarem Gurobi je soubor .sol, který uvádí výsledky pro jednotlivé proměnné v prosté textové podobě. Pro větší názornost byly tyto výsledky v prostředí programu Microsoft Excel znázorněny také zjednodušeně graficky, což slouží k prezentaci výsledků v této kapitole.

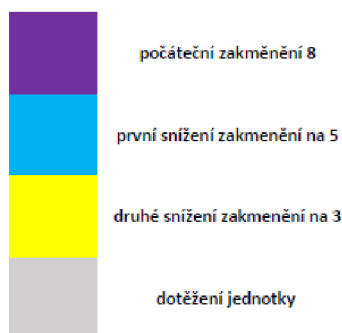
5.1 Modely bez aplikace na porostní data

5.1.1 Model 1

Grafické znázornění řešení tohoto modelu zobrazuje obrázek 5.1. Barevné rozlišení vyjadřuje jednotlivé zásahy podle legendy na obrázku 5.2. Čísla jednotlivých obnovních prvků jsou v tomto případě pouze pořadová čísla. Řešení je odpovídající vzhledem k jednoduchosti modelu. Výsledná hodnota účelové funkce je 292 m^3 , což ale v tomto případě není vypovídající, vzhledem k tomu, že se jedná pouze o nereálné modelové hodnoty. K dotěžení porostu chybí ještě 4 zásahy, které by byly realizovatelné v následující periodě.



Obrázek 5.1 – grafické znázornění řešení Modelu 1



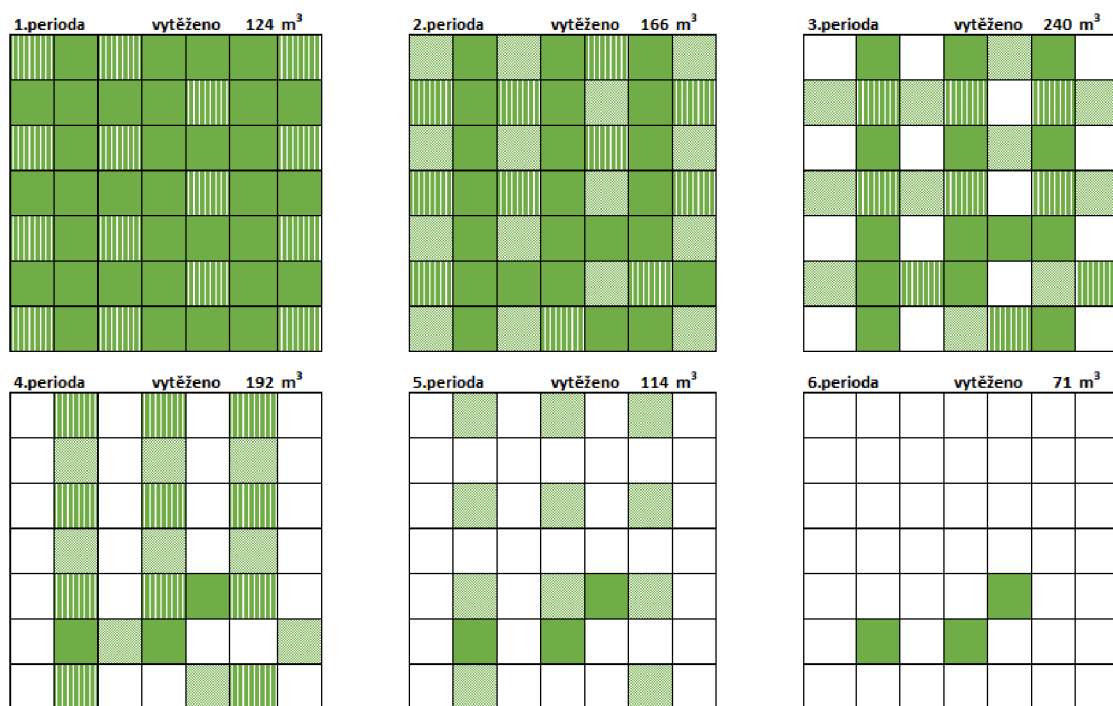
Obrázek 5.2 - legenda k obrázku 5.1

5.1.2 Model 2

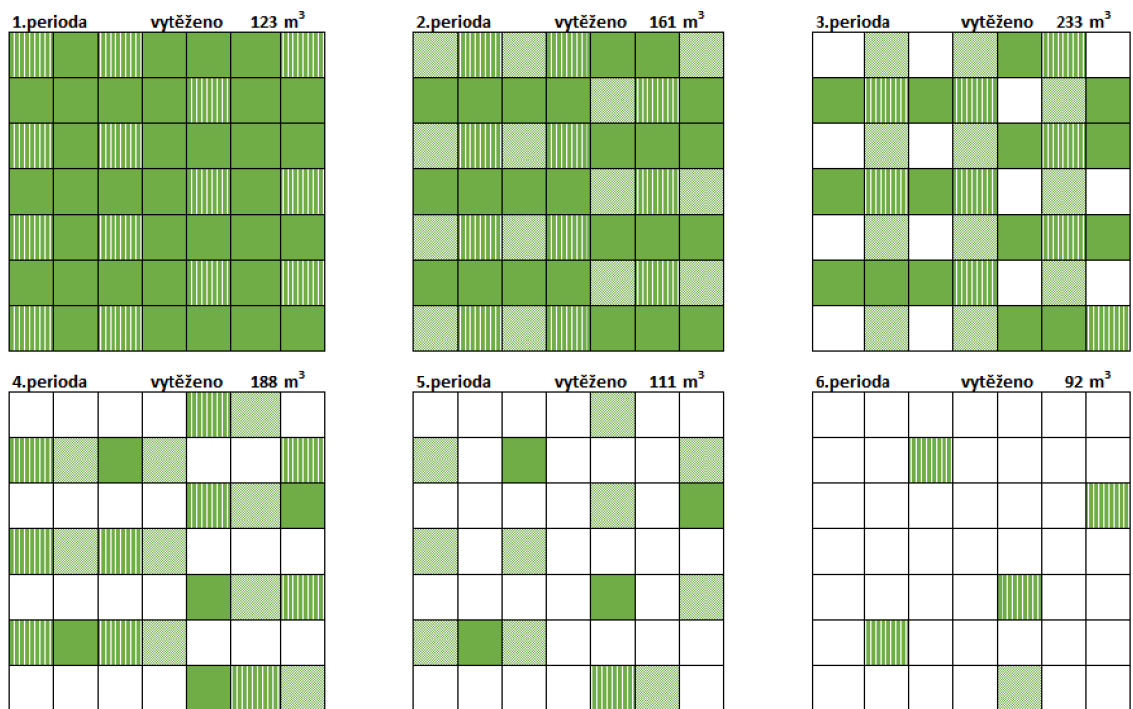
Význam prvků v grafickém znázornění v této kapitole uvádí legenda na obrázku 5.5 a pořadová čísla obnovních prvků jsou znázorněna na obrázku 5.6. Grafické zobrazení řešení Modelu 2.1 je zobrazeno na obrázku 5.3. V této variantě modelu se projevila podmínka dokončení obnovy podle rovnice 4.17 zajišťující ponechání tří prvků bez zásahu. Bez zásahu byly ponechány obnovní prvky, které měly nejmenší zásobu dříví. Oproti tomu se varianta Model 2.2 odlišovala v podmínce dokončení obnovy definované rovnicí 4.18, což se projevilo nevykonáním 9 zásahů a ponecháním 5 nedokončených obnovních prvků. Ve čtyřech případech byly ponechány prvky, kde zbývalo provést dva zásahy a v jednom případě jeden zásah. V tomto případě byly provedeny na všech obnovních prvcích první zásahy.

Konstrukce modelů zahrnující také podmínky vyrovnanosti umožnila zjistit výši těžeb v jednotlivých periodách a vyrovnanost výše těžeb napříč periodami. V obou variantách modelu dochází k přibližně podobnému průběhu výše těžeb, přičemž nejvyšší těžba je ve třetí periodě. To je dáno tím, že je v této periodě možné realizovat už i třetí zásah a ještě je dostatek obnovních prvků k těžbě předchozími zásahy. V následujících periodách výše těžeb klesá, jak je patrné z grafů 5.1 a 5.2. Hodnota $A = 0,45$ v podmínce vyrovnanosti vychází z manuálního zkoušení hodnot jako nejnížší možná hodnota, při které bylo možné nalézt optimální řešení (hodnoty byly zkoušeny po 0,05).

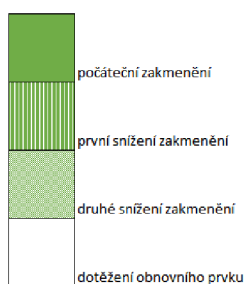
Celková výše těžeb byla v případě varianty 2.1 907 m³ a v případě varianty 2.2 908 m³ z 920 m³, které by bylo možné potenciálně vytěžit při vytěžení všech obnovních prvků.



Obrázek 5.3 - Grafické zobrazení řešení Modelu 2.1



Obrázek 5.4 - Grafické zobrazení řešení Modelu 2.2

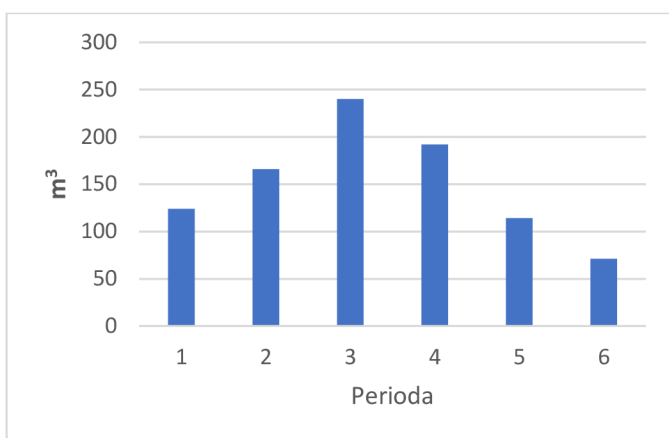


Obrázek 5.5 - legenda ke grafickému znázornění modelů

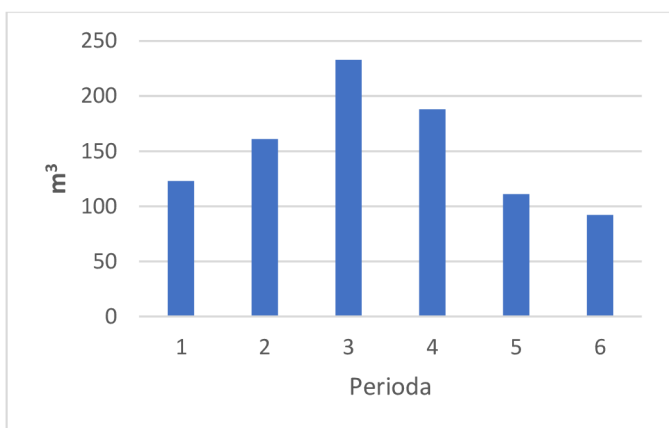
schéma pořadových čísel obnovních prvků

1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	32	33	34	35
36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49

Obrázek 5.6 - schéma pořadových čísel obnovních prvků Modelů 2



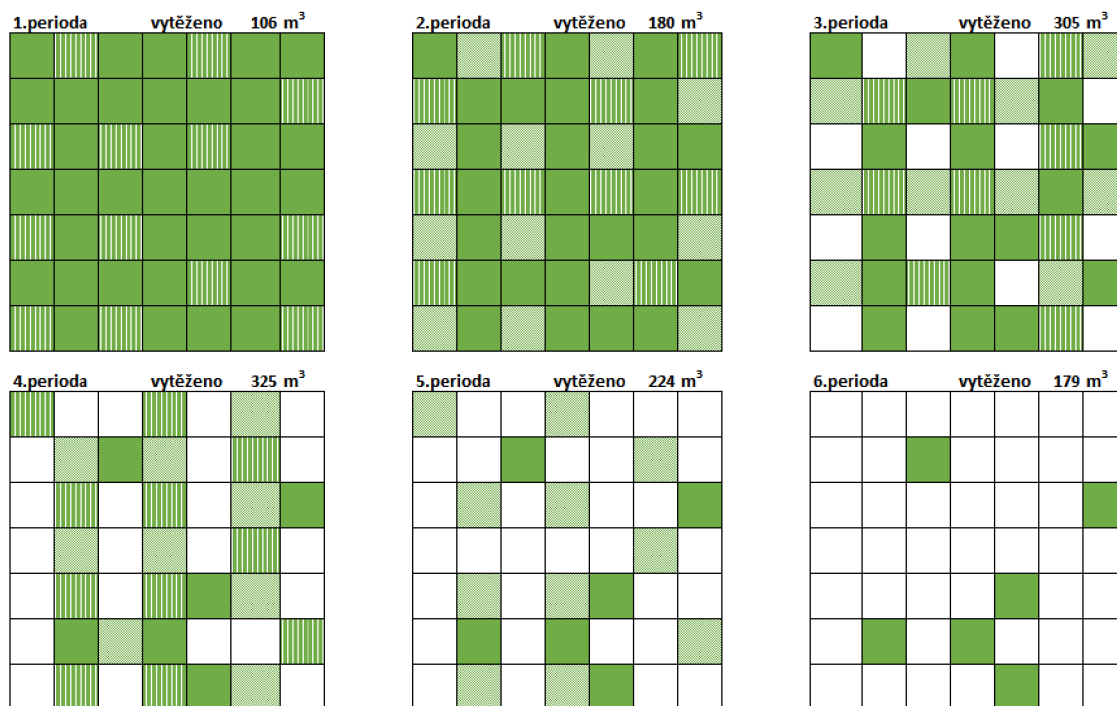
Graf 5.1 – těžba podle period Model 2.1



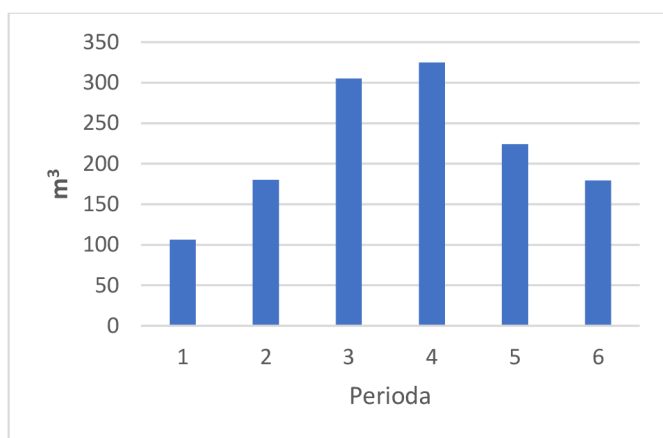
Graf 5.2 – těžba podle period Model 2.2

5.1.3 Model 3

V tomto modelu platí stejná legenda a číslování obnovních prvků jako v předchozím modelu (obrázky 5.5 a 5.6). Vlivem zahrnutí přírůstu se oproti Modelu 2 změnila výše těžeb v jednotlivých periodách a také relativní rozdíly ve výši těžeb byly mezi periodami větší (graf 5.3) vlivem nastavení hodnoty $A = 0,7$. Podmínka dokončení obnovy v tomto případě zajišťovala ponechání šesti obnovních prvků kompletně bez těžby, mezi které byly v řešení zahrnuty také prvky ponechané bez zásahů v modelech 2.1 a 2.2.



Obrázek 5.7 - Grafické zobrazení řešení Modelu 3

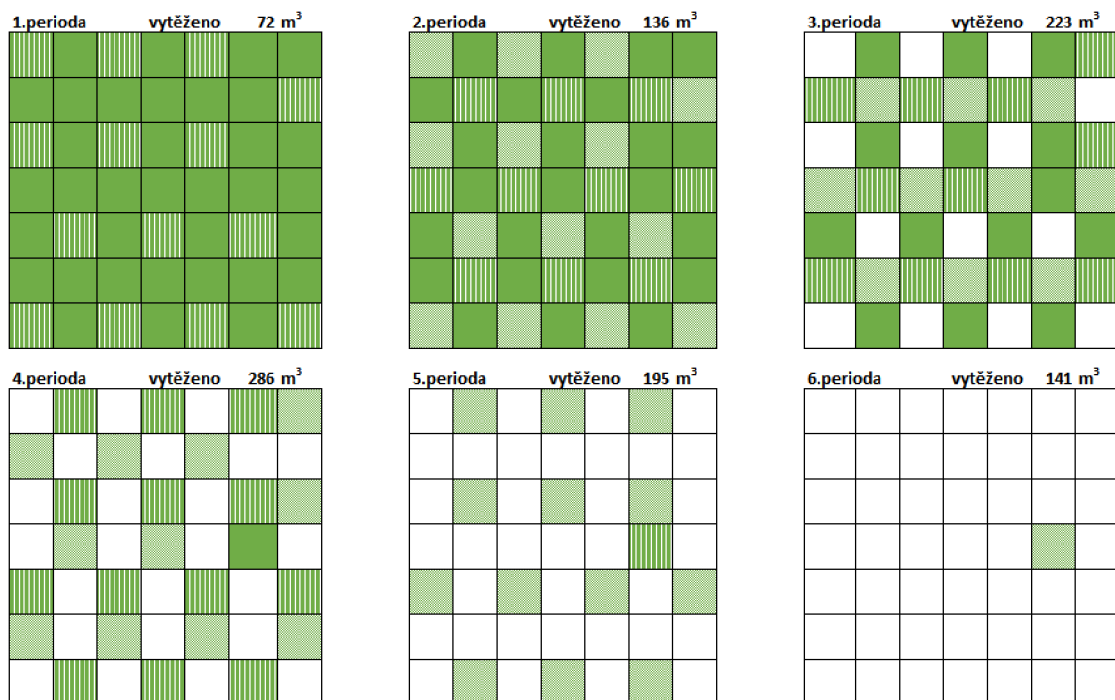


Graf 5.3 – těžba podle period Model 3

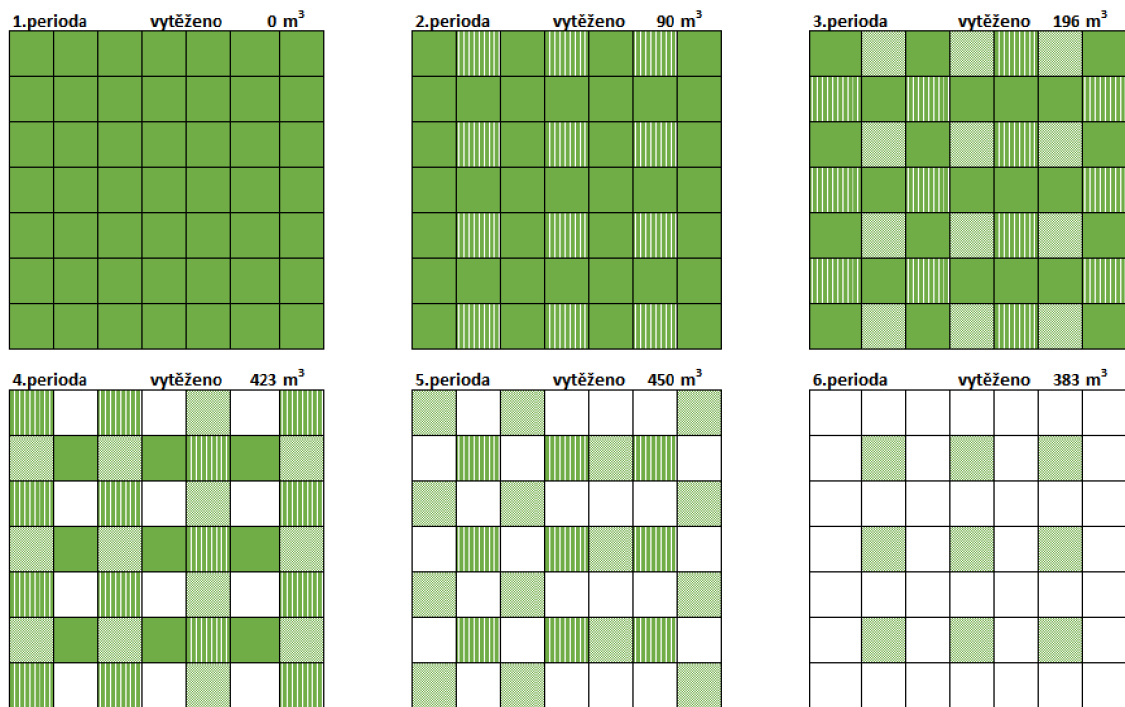
5.1.4 Model 4

Model 4.1 měl díky menšímu přírůstu více vyrovnané těžby (graf 5.4), než Model 4.2 (graf 5.5), jelikož nebylo potřeba k maximalizaci těžby posunout zásahy co nejvíce do pozdějších period na úkor jejich nedokončení (obrázek 5.8), jak tomu bylo v modelu 4.2 (obrázek 5.9), ve kterém nebyly v první periodě provedeny žádné zásahy a ve čtvrté, páté a šesté periodě byla podstatně větší výše těžeb než v první, druhé a třetí periodě. I

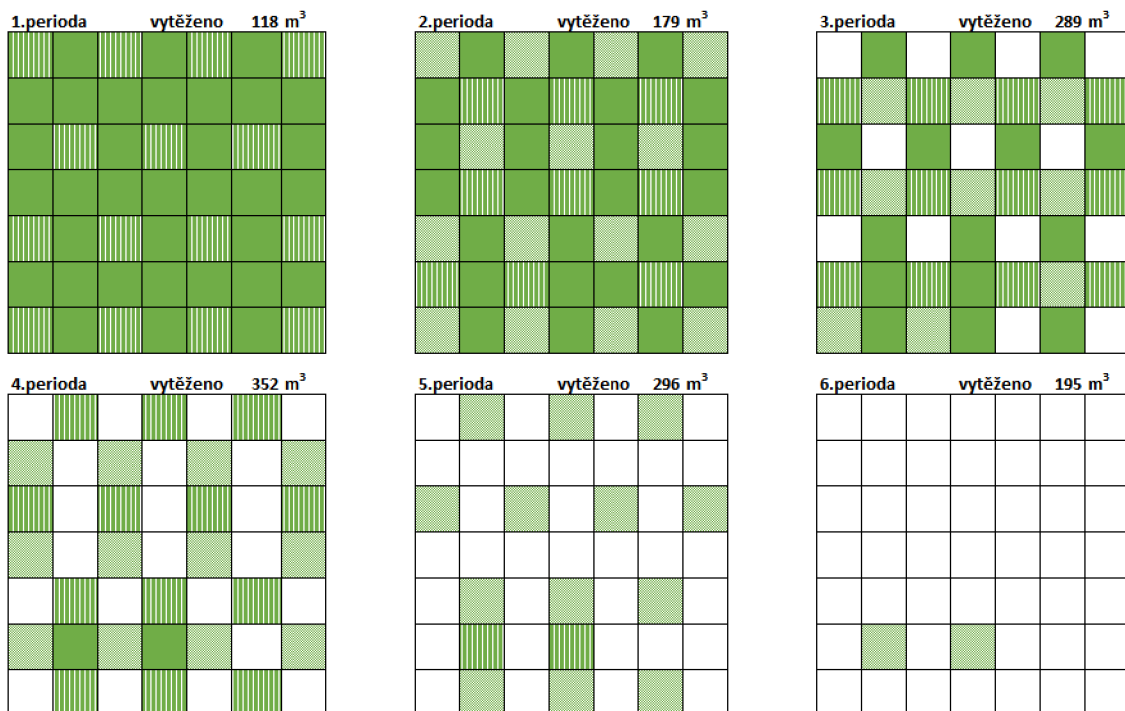
přesto nebyla ani v Modelu 4.1 kompletně dokončena obnova celého porostu, jelikož podmínky dokončení obnovy tento model nezahrnoval. Model 4.3 vykázal větší vyrovnanost těžeb vlivem zavedení podmínek vyrovnanosti, ovšem i tak musela být hodnota $A = 0,7$, aby bylo možné nalézt řešení. V tomto modelu se projevila podmínka následnosti druhého typu na obnovních prvcích 43 a 45 (číslováno podle obrázku 5.6). Na těchto obnovních prvcích došlo k prvnímu snížení zakmenění v první periodě, následovalo druhé snížení zakmenění ve druhé periodě, ale ve třetí periodě byly obnovní prvky ponechány bez zásahu a dotěžení proběhlo až ve čtvrté periodě. V modelech 4.1 a 4.2 se tato sada podmínek neprojevila. Uplatnění podmínek následnosti druhého typu lze přičítat kombinaci vysokého přírůstu (cca 15 %) a podmínek vyrovnanosti. Ačkoliv se při nereálně vysokém přírůstu pro naplnění podstaty účelové funkce vyplatí posouvat zásahy do pozdějších period, podmínky vyrovnanosti zamezují provádění velkého množství zásahů v druhé polovině obmýtí, jak je tomu v Modelu 4.2. Podmínky následnosti druhého typu tak umožňují více vyrovnat výši těžeb mezi jednotlivými periodami, ačkoliv tento jev není příliš výrazný.



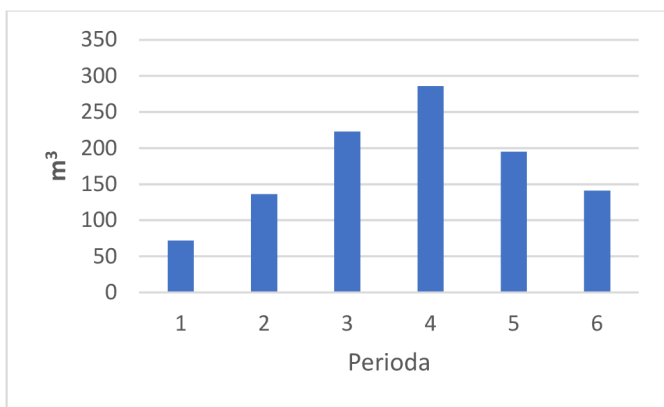
Obrázek 5.8 - Grafické zobrazení řešení Modelu 4.1



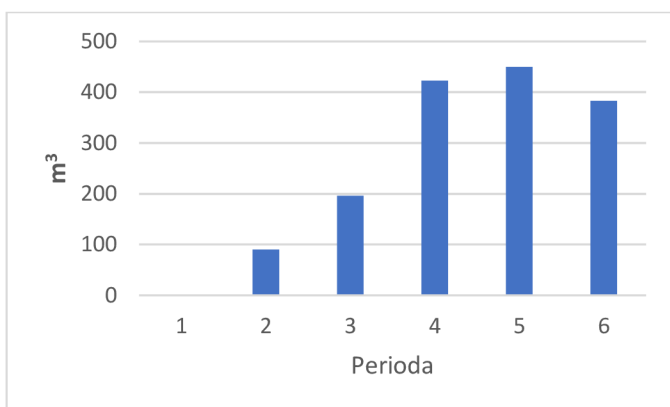
Obrázek 5.9 - Grafické zobrazení řešení Modelu 4.2



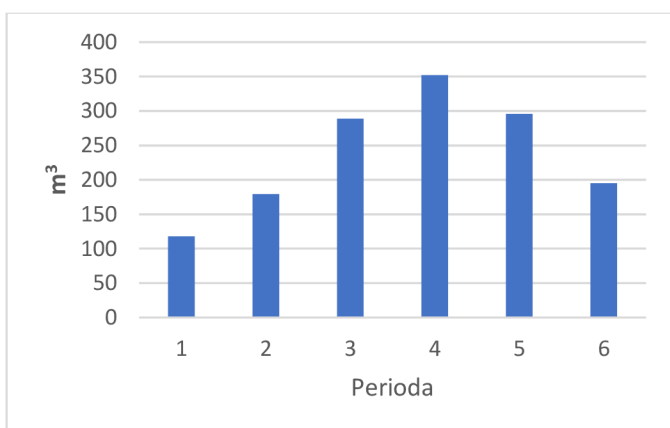
Obrázek 5.10 – Grafické zobrazení řešení Modelu 4.3



Graf 5.4 – těžba podle period Model 4.1



Graf 5.5 – těžba podle period Model 4.2



Graf 5.6 – těžba podle period Model 4.3

5.2 Modely s aplikací na simulované porosty

V těchto modelech se oproti předchozím změnilo z praktických důvodů číslování obnovních prvků podle obrázku 5.11 a barevné znázornění zásahů odpovídá legendě na obrázku 5.12. Čísla ve schématických zobrazeních udávají počet provedených zásahů.

1	8	15	22	29	36	43
2	9	16	23	30	37	44
3	10	17	24	31	38	45
4	11	18	25	32	39	46
5	12	19	26	33	40	47
6	13	20	27	34	41	48
7	14	21	28	35	42	49

Obrázek 5.12 – Číslování obnovních prvků



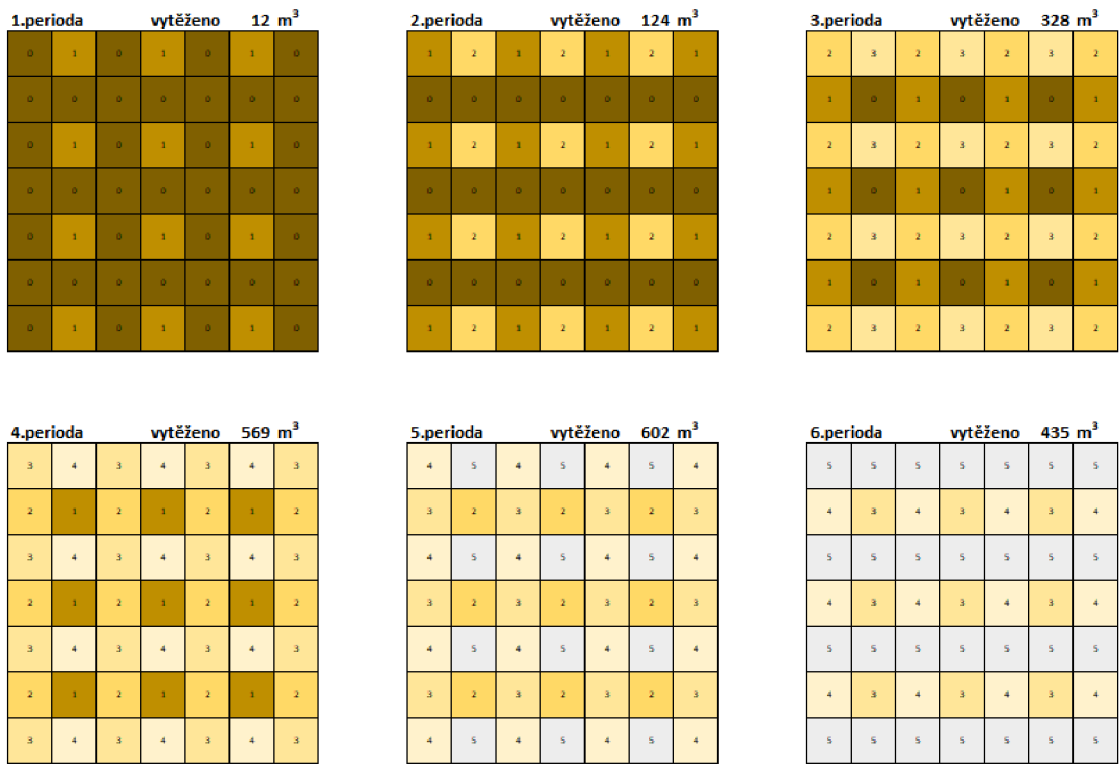
Obrázek 5.11 – Legenda barevného znázornění zásahů

5.2.1 Model 5

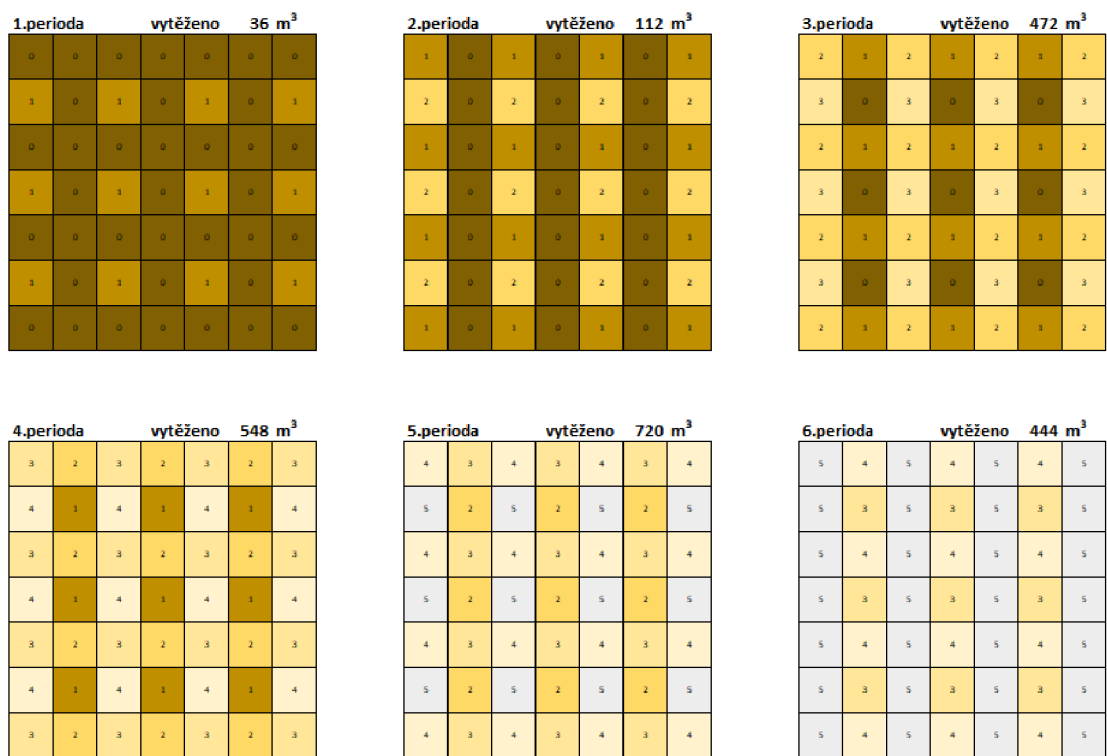
Modely 5.1 a 5.2 měly jednoduše schematicky uspořádané řešení s ohledem na nulovou variabilitu zásob mezi obnovními prvky a použití standardních podmínek. Obnova nebyla během 6 period dokončena, protože s ohledem na podmínky sousednosti není možné kompletně umístit do porostu pět zásahů během šesti period. To neplatí pro Model 5.3, kde byly podmínky sousednosti vynechány. U modelů 5.1 a 5.2 se lišilo prostorové umístění zásahů na obnovní prvky, ale charakter provedení obnovy se zásadně nelišil (obrázek 5.13 a 5.14). Rozdílná doba trvání periody při simulaci u těchto dvou modelů způsobila, že celková výše těžby byla vlivem přírůstu v případě Modelu 5.2 o 11 % větší (2332 m³) než v případě Modelu 5.1 (2070 m³). Vyrovnanost těžeb nebylo možné dosáhnout vlivem nastavení podmínek. Aby bylo možné dosáhnout větší vyrovnanosti těžeb a zároveň dokončit obnovu porostu, musela by být obnovní doba delší. V modelech 5.1 a 5.2 jsou nízké zejména těžby v prvních dvou periodách, protože je možné realizovat pouze první a později první a druhý zásah. Oproti tomu nejvyšší těžba je v obou těchto modelech v páté periodě, jelikož je možné realizovat všechny zásahy a zároveň je ještě v porovnání se šestou periodou dostatek obnovních prvků k těžbě.

V Modelu 5.3 byla vyrovnanost těžeb lepší, jelikož byly zahrnuty i podmínky vyrovnanosti, byť ne v kompletní podobě. Ačkoliv nebyla prováděna simulace pro tento model, hodnoty těžeb byly převzaty z Modelu 5.2 a délka periody byla tím pádem také 10 let. Tento model také znázorňuje rozdíl mezi skupinovou maloplošnou podrobnou obnovou reprezentovanou obnovními prvky o velikosti 10 arů v modelech 5.1 a 5.2 a velkoplošnou clonnou sečí s pěti zásahy v Modelu 5.3. Velkoplošný zásah umožňuje podstatně rychlejší obnovení porostu, avšak obnovní doba je stále poměrně dlouhá. Nedochází při tom k zásadnímu odchýlení od přírodě blízkých postupů, jelikož zásahy jsou stále poměrně slabé a málo časté. Maloplošná obnova naproti tomu vyžaduje obnovní dobu delší, která by při požadavku vyrovnanosti směřovala k výběrnému způsobu hospodaření a nepřetržité obnovní době.

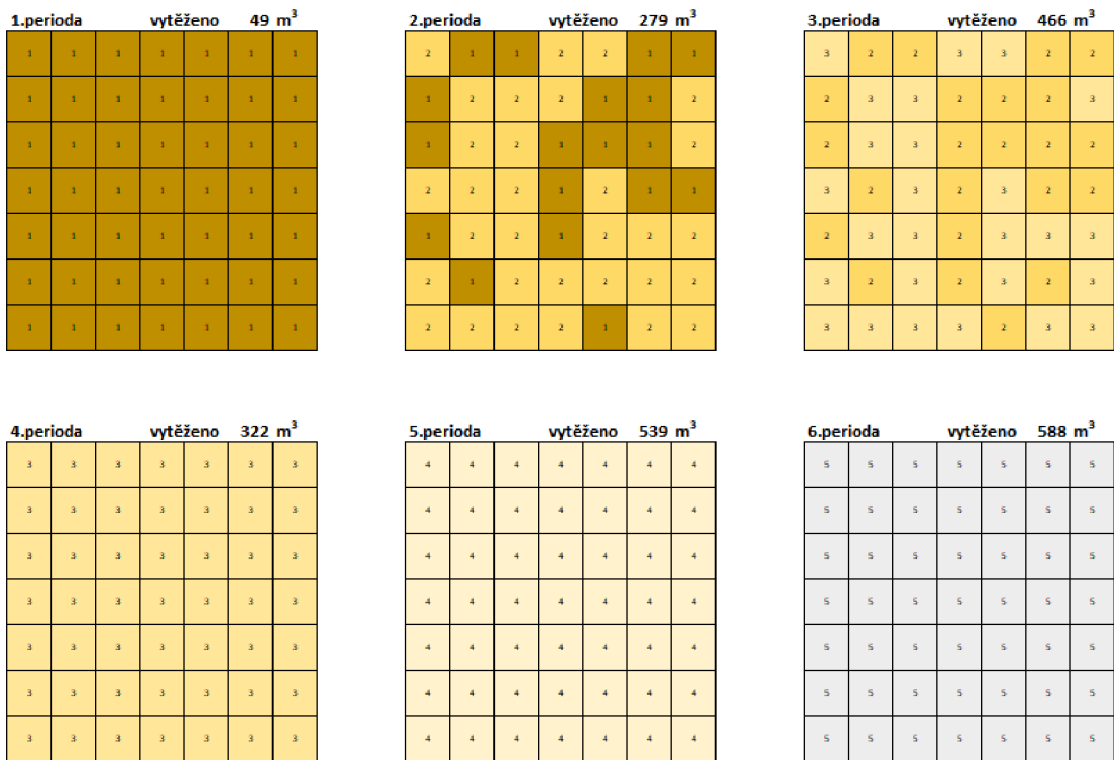
Kromě toho se v Modelu 5.3 projevila i sada podmínek následnosti druhého typu, kdy část obnovních prvků, na kterých bylo zasahováno v první periodě, zůstala ve druhé periodě bez zásahu a pokračovalo se na nich s těžbou až ve třetí periodě. Pod tímto si lze v praxi představit například odlišný přístup ke dvěma druhům dřevin v porostu, kdy jedna z nich je uvolňována rychleji z důvodu určitého pěstebního záměru, byť v tomto případě byl porost simulován jako jednodruhový. V případě dvou dřevin by bylo možné pro obnovní prvky s dřevinou, která by měla být uvolňována rychleji, použít podmínky následnosti prvního typu a pro dřevinu, která by mohla být případně uvolňována pomaleji, použít podmínky následnosti druhého typu.



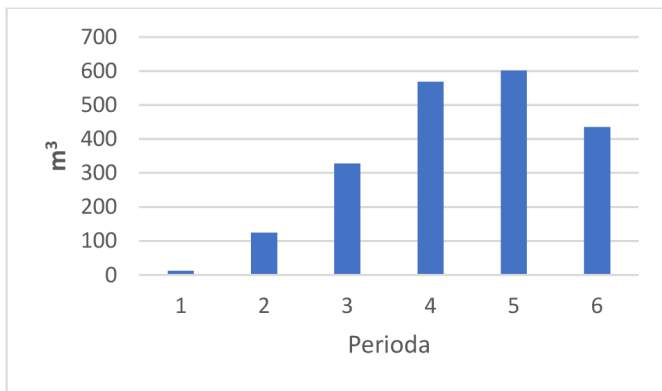
Obrázek 5.13 – Grafické zobrazení řešení Modelu 5.1



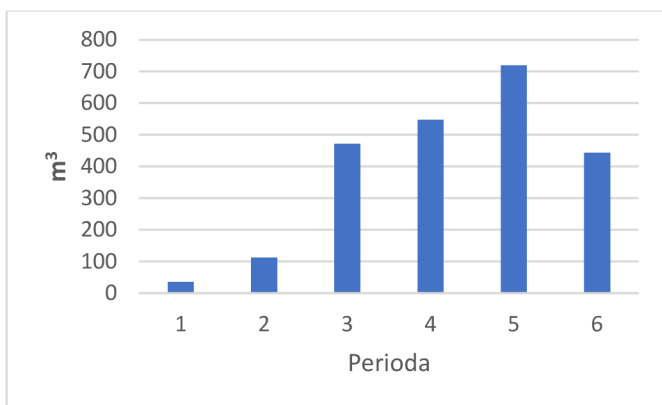
Obrázek 5.14 - Grafické znázornění řešení Modelu 5.2



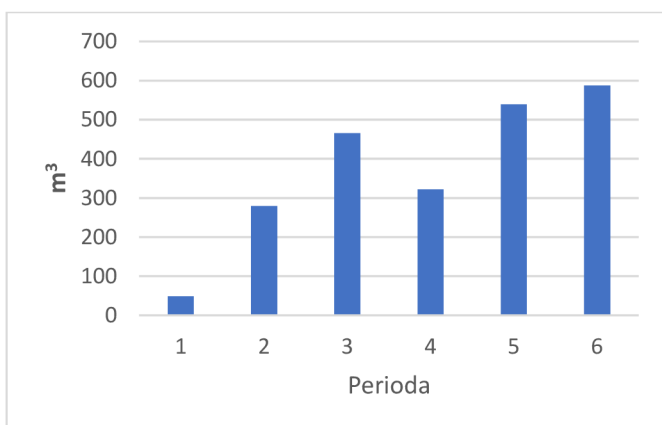
Obrázek 5.15 - Grafické znázornění řešení Modelu 5.3



Graf 5.7 – Těžby podle period – Model 5.1



Graf 5.8 – Těžby podle period – Model 5.2



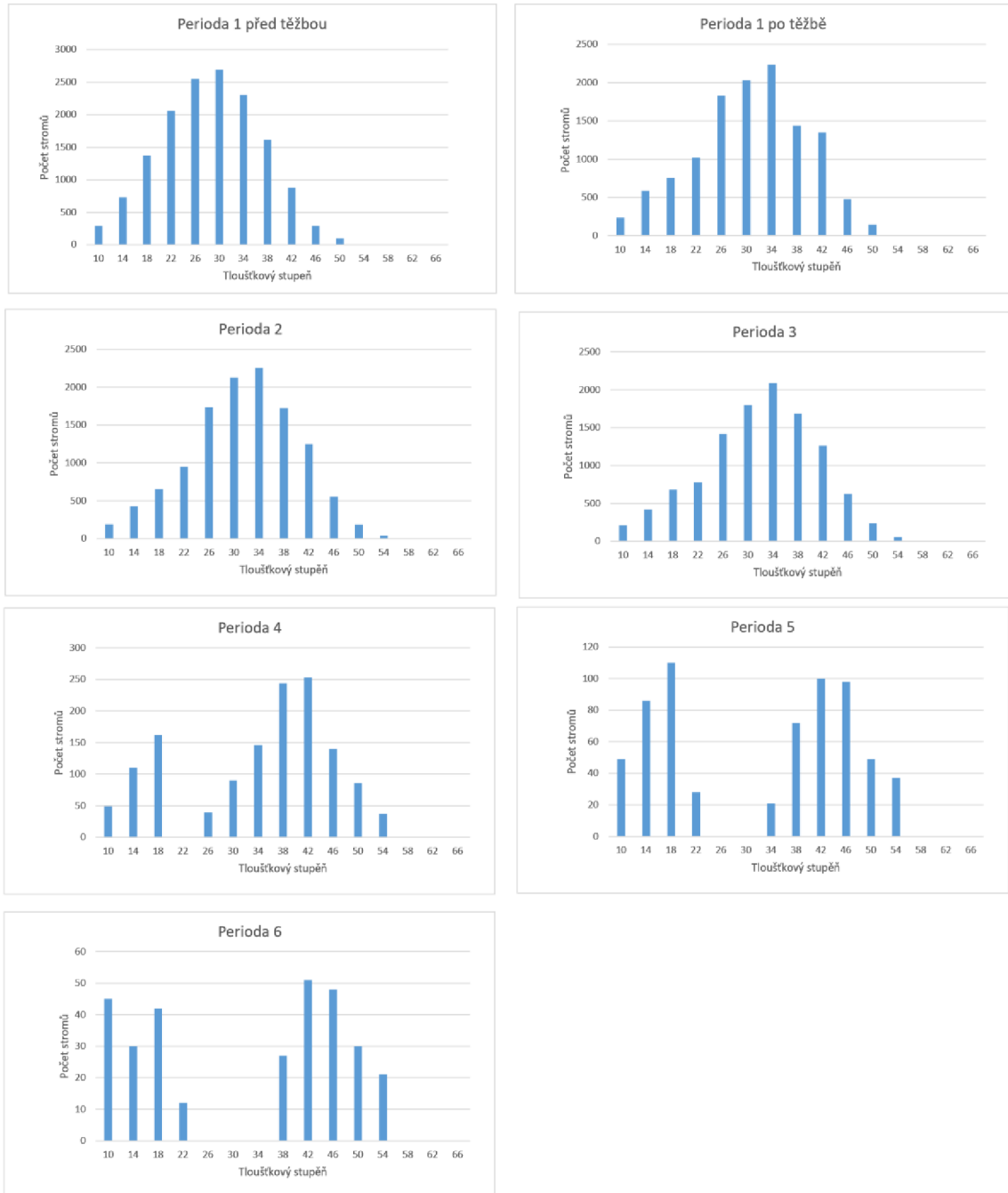
Graf 5.9 – Těžby podle period – Model 5.3

Dlouhá obnovní doba s postupnými mírným maloplošnými zásahy je předpokladem vzniku nestejnověkého porostu. Stejnověký porost se vyznačuje jednovrcholovou tloušťkovou strukturou blízkou normálnímu rozdělení. Maximálně různověký porost představovaný výběrným lesem je reprezentován klesající tloušťkovou křivkou s největším počtem jedinců v nejtenějších tloušťkových stupních. Postup obnovy navržený v modelech 5.1 a 5.2 předpokládal vývoj tloušťkové struktury od jednovrcholové k tzv. klesající „J“ křivce. Vývoj tloušťkových struktur v průběhu obnovy porostu na základě simulací a modelů 5.1 a 5.2 zobrazují obrázky 5.16 a 5.17.

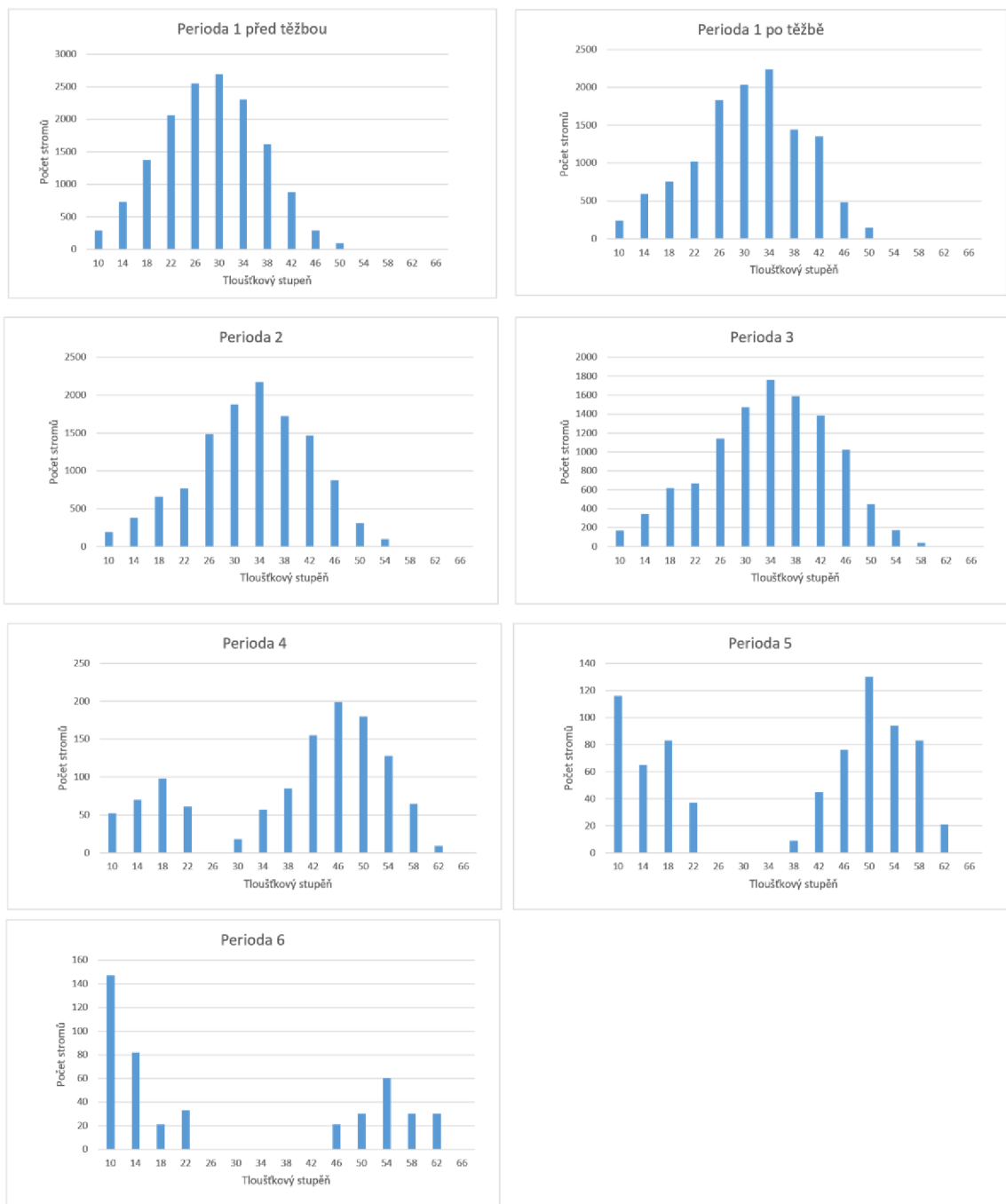
V obou porostech byla tloušťková struktura zpočátku typicky jedno vrcholová a postupnými zásahy se měnila. K největší změně došlo v obou případech ve čtvrté periodě, kdy bylo provedeno nejvíce zásahů a tloušťková struktura získala dvouvrcholový

charakter. Vzhledem k nedokončení obnovy přetrvával dvouvrcholový charakter i v páté a šesté periodě.

Rozdíl v délce trvání period se jednoznačně projevil v počtu stromů v nejtenčích tloušťkových stupních v posledních periodách. V případě Modelu 5.2 s periodou délky 10 let byl počet stromů v tloušťkovém stupni 10 a 14 podstatně větší než u Modelu 5.1.



Obrázek 5.16 – Vývoj tloušťkové struktury poroty – Model 5.1

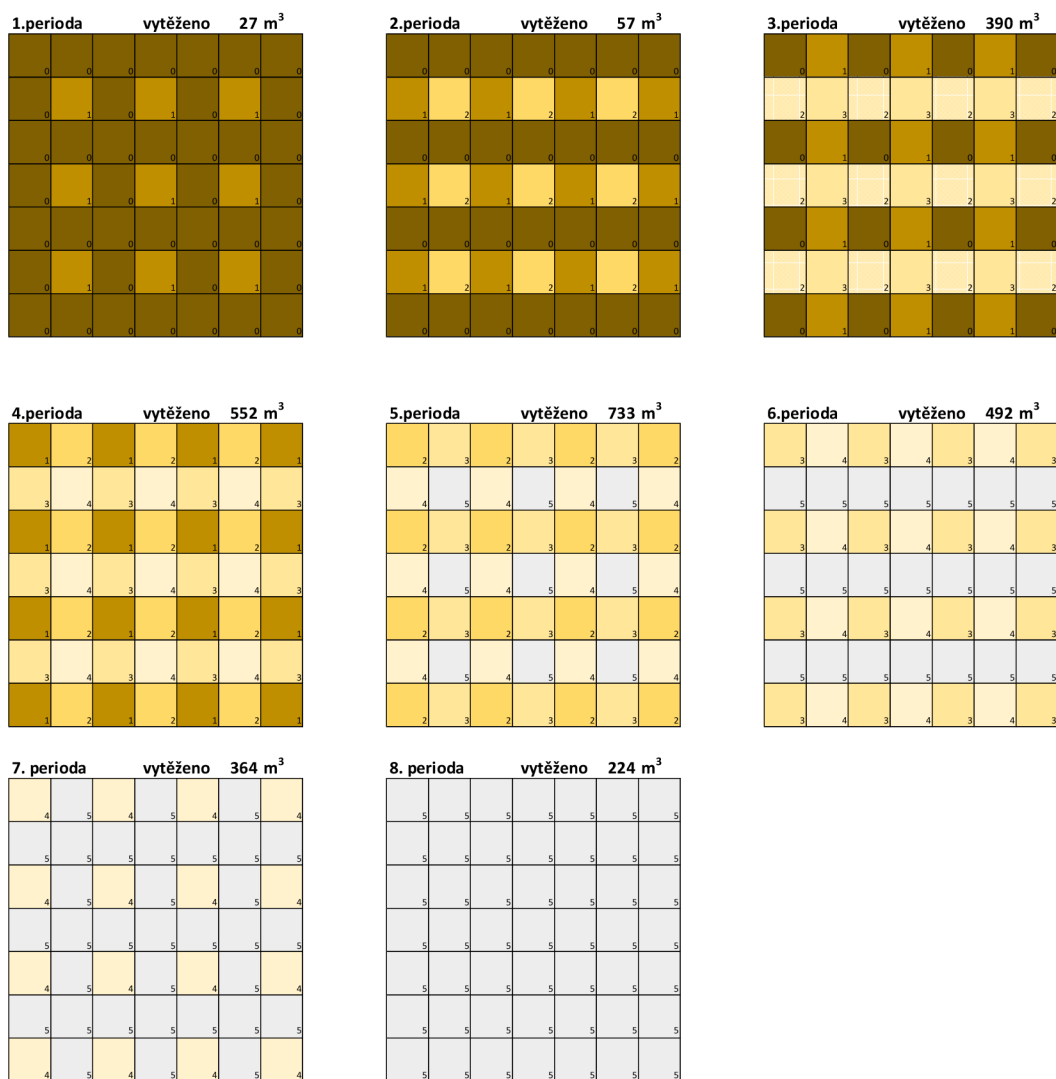


Obrázek 5.17 - Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 5.2

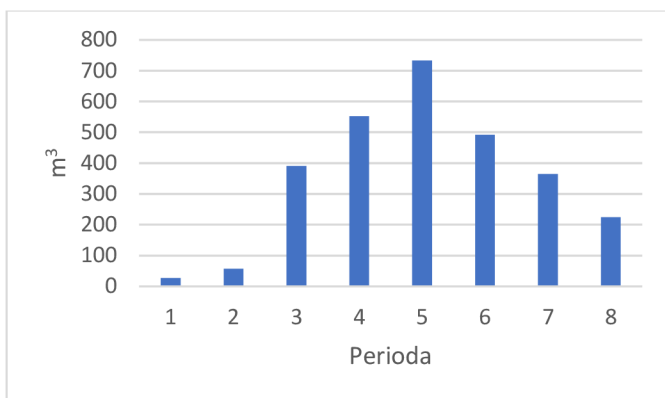
5.2.2 Model 6

Řešení tohoto modelu bylo opět jednoduše schématické (obrázek 5.18), ovšem díky 8 periodám, na které byla obnova navržena, mohl být porost kompletně obnoven. Vyrovnanosti těžeb nebylo dosaženo s ohledem na ostatní omezující podmínky, a proto

v prvních dvou periodách byly těžby výrazně menší než v ostatních a největší výše těžeb připadala do páté periody z důvodů popsaných výše (graf 5.10).

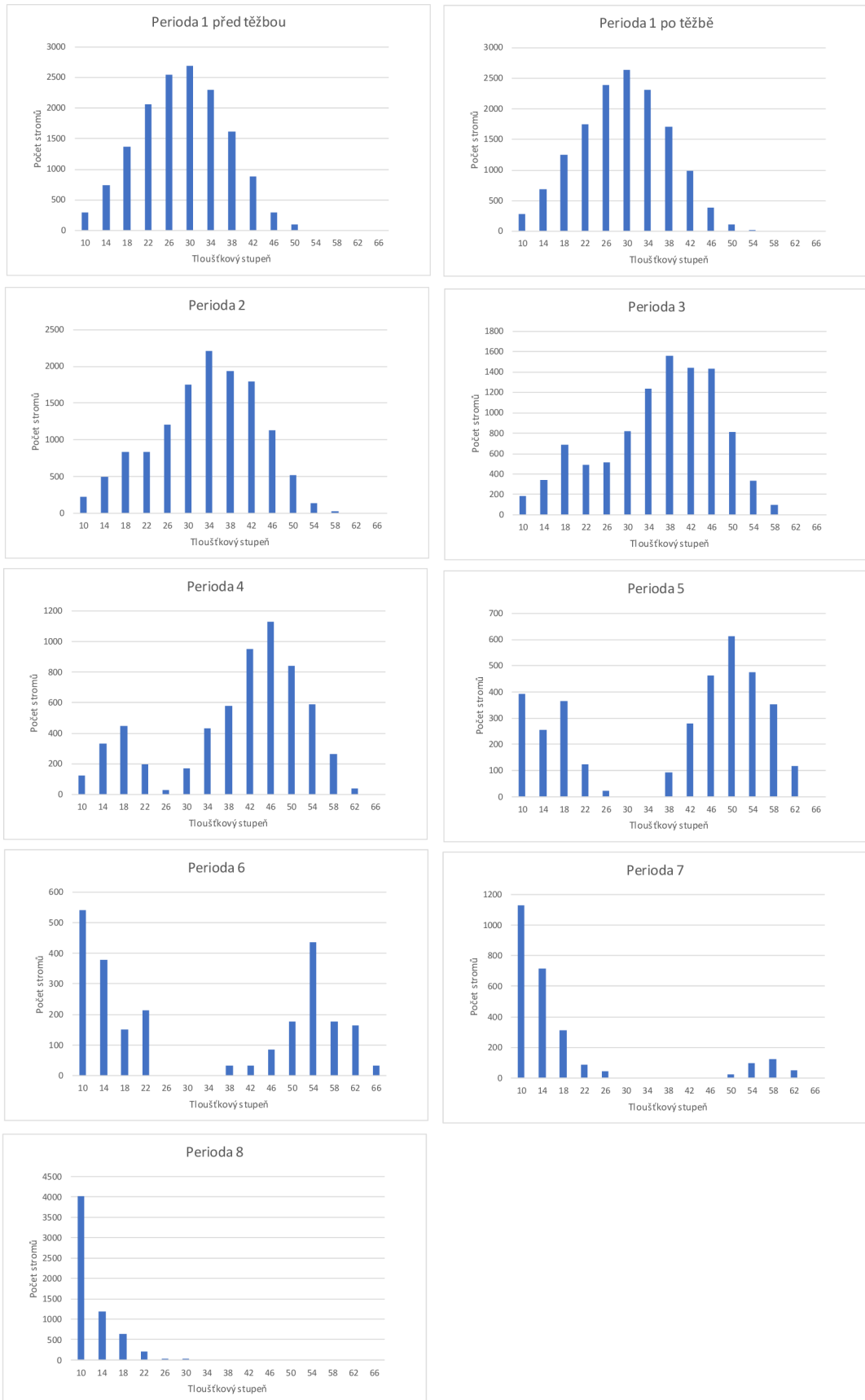


Obrázek 5.18 – Grafické znázornění řešení Modelu 6



Graf 5.10 – Těžby podle period – Model 6

Hlavním sledovaným jevem zde byl vývoj tloušťkové struktury porostu v průběhu obnovy. Vývoj v průběhu obnovy byl obdobný jako v modelech 5.1 a 5.2, ale díky přidání dalších dvou period mohl být porost dotěžen a nově vznikající porost vykázal tloušťkovou strukturu klesajícího tvaru s největším počtem jedinců v nejtencím tloušťkovém stupni, jak je znázorněno na obrázku 5.19.



Obrázek 5.19 – Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 6

5.3 Modely s aplikací na reálné porosty

Tato kapitola popisuje výsledky aplikace modelů na reálné porosty, konkrétně porost 510A10. Vytvořeny byly dvě varianty modelu, výsledky jejich řešení jsou zobrazeny pro lepší názornost graficky po vzoru předchozích teoretických modelů. Barevné vyjádření odpovídá legendě na obrázku 5.11, pořadová čísla obnovních prvků odpovídají obrázku 4.1.

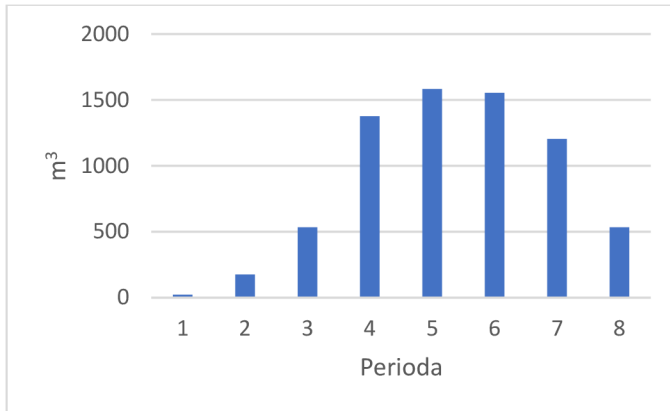
5.3.1 Model 510.1

Na obrázku 5.20 je graficky znázorněno řešení tohoto modelu. Model byl změřen na skupinovitě clonnou obnovu porostu, a proto obsahoval podmínky sousednosti, které znemožňovaly těžbu dvou sousedních obnovních prvků stejným zásahem v jedné periodě. Výjimkou byly obnovní prvky 2 a 3 a prvky 9 a 7 (číslování podle obrázku 4.1), které sice sousedí rohy, ale podmínky sousednosti pro ně nebyly definovány, jelikož jsou mezi nimi jiné porostní skupiny a toto omezení by z praktického hlediska nemělo význam. V tomto přizpůsobení konkrétním specifikům daného porostu je rozdíl oproti výše popisovaným teoretickým modelům. Vzhledem k maximalizaci těžeb byly zásahy posunuty do pozdějších period, ale zároveň musela být splněna podmínka dokončení obnovy během obnovní doby 80 let. Z toho vyplývá nižší počet zásahů v prvních periodách a jeho maximum ve středu obnovní doby.

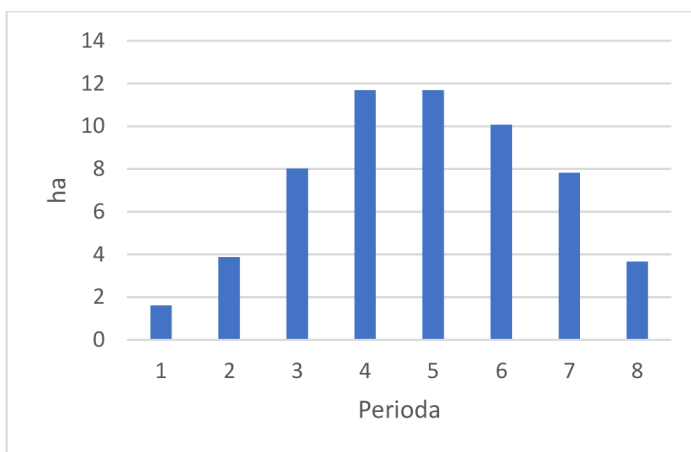
Graf 5.11 zobrazuje výši těžeb v jednotlivých periodách. V první až třetí periodě byla výše těžeb výrazně nižší, než v následujících periodách (s výjimkou poslední). K tomuto dochází jednak kvůli přírůstu a s tím související maximalizaci těžeb, jednak kvůli nemožnosti umístění více zásahů do prvních period a v tomto případě také kvůli nižšímu zakmenění při započetí obnovy. Jelikož první zásahy byly nastaveny na snižování zakmenění z 1 na 0,8 a podle dat z LHP bylo zakmenění 0,8, byla těžba v první periodě velmi malá. To, že vůbec k těžbě došlo lze přičítat možným rozdílům při výpočtu zakmenění při tvorbě LHP a v programu Sibyla, zaokrouhlování hodnot atd.

Graf 5.12 zobrazuje celkové plochy, na kterých byly prováděny zásahy v jednotlivých periodách. Na rozdíl od těžeb není patrný například rozdíl mezi čtvrtou a

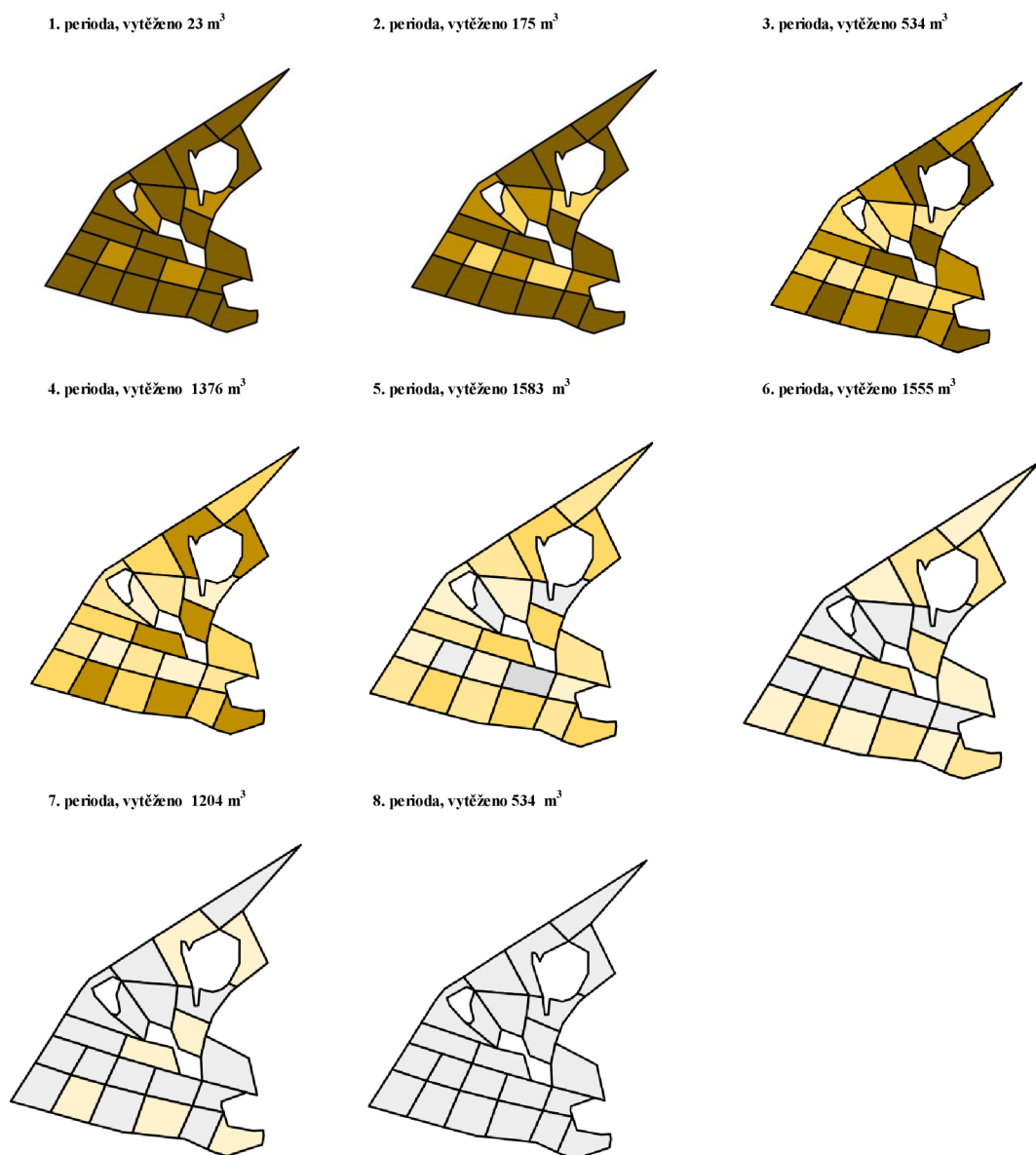
pátou periodou, jelikož bylo v obou periodách zasahováno v celém porostu. V případě těžeb je těžba větší v páté periodě, což je dáno vlivem přírůstu.



Graf 5.11 – těžby podle period – Model 510.1

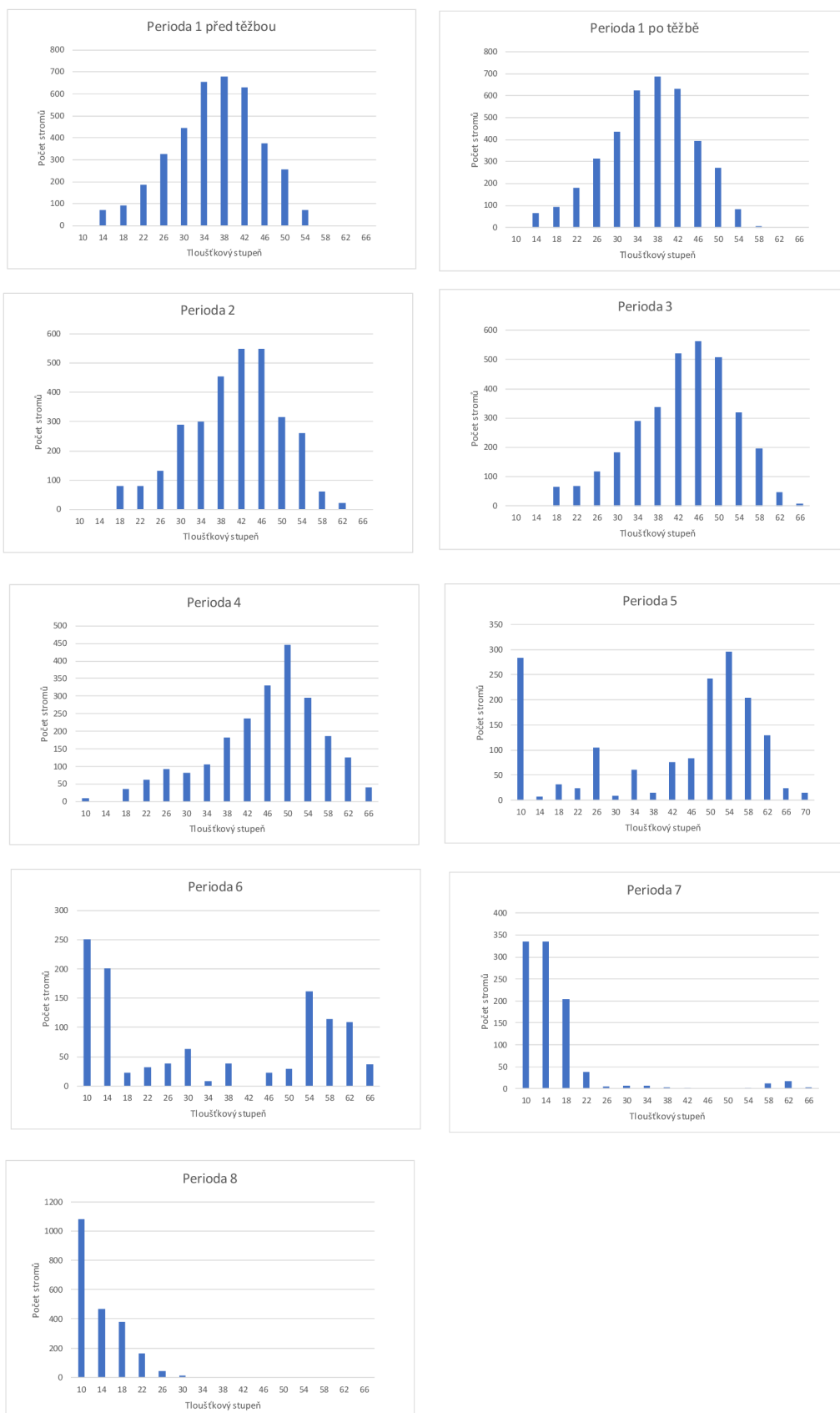


Graf 5.12 - plocha zásahů podle period - Model 510.1



Obrázek 5.20 – grafické znázornění řešení Modelu 510.1

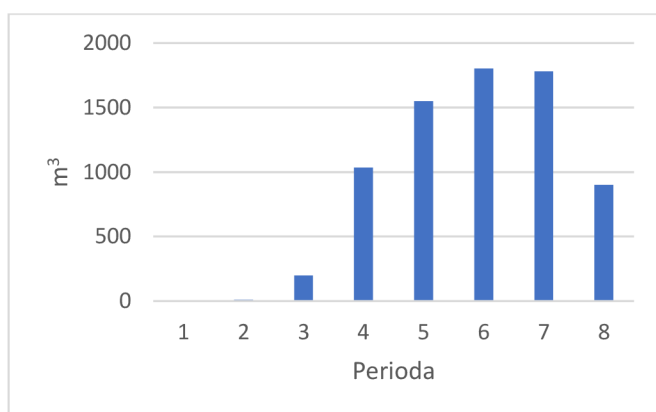
Obrázek 5.21 zobrazuje vývoj tloušťkové struktury v průběhu obnovy porostu. Vývoj je obdobný jako v Modelu 6, během osmi period byl porost kompletně obnoven a bylo dosaženo klesající tloušťkové struktury s největším zastoupením v nejnižších tloušťkových stupních.



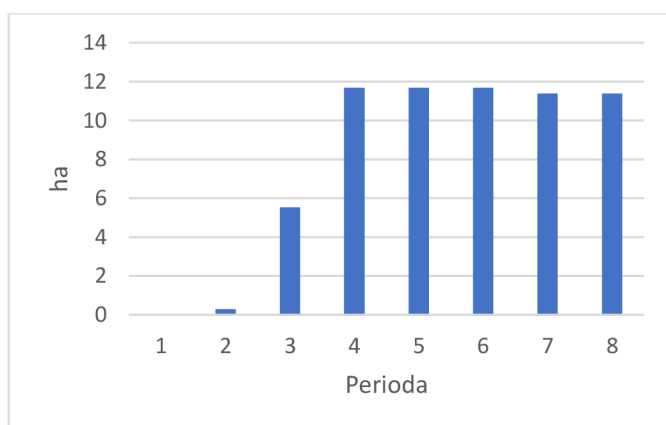
Obrázek 5.21 - Vývoj tloušťkové struktury porostu - Model 510.1

5.3.2 Model 510.2

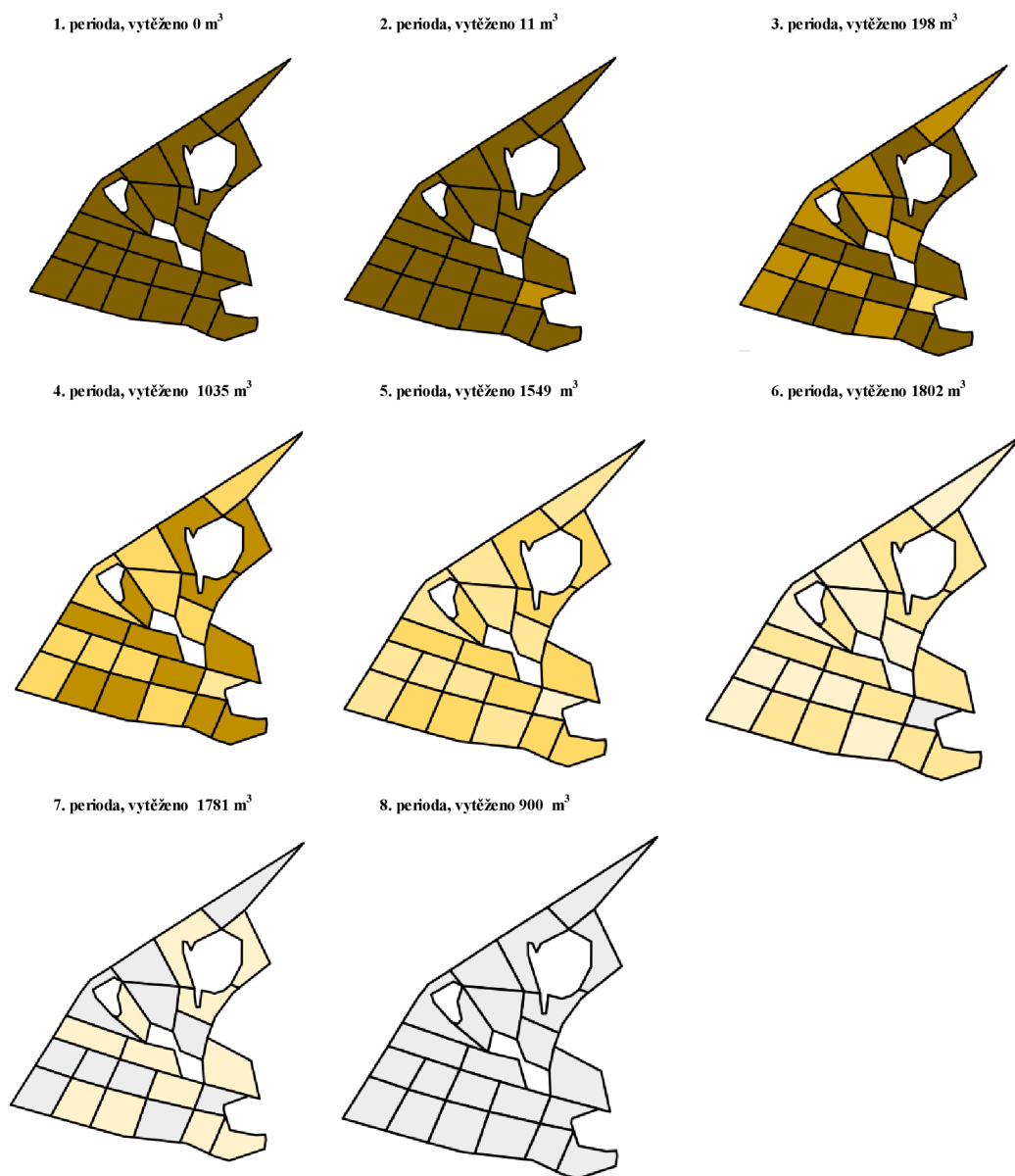
Výsledek tohoto modelu je zachycen na obrázku 5.22. Jelikož byl tento model navržen pro velkoplošnou clonnou obnovu, bylo možné obnovit celý porost rychleji. V první periodě proto nebyl proveden žádný zásah a v druhé periodě pouze jeden zásah s ohledem na maximalizaci výše těžeb. Většina zásahů byla provedena v druhé polovině obmýtí. Graf 5.13 zobrazuje výši těžeb v jednotlivých periodách, která odpovídá většině realizovaných zásahů v druhé polovině obmýtí. Graf 5.14 zobrazuje celkovou plochu zásahů v jednotlivých periodách, která je více vyrovnaná než v případě Modelu 510.1, ovšem i s tím, že v prvních periodách je podstatně menší než v předchozím modelu.



Graf 5.13 – těžby podle period – Model 510.2

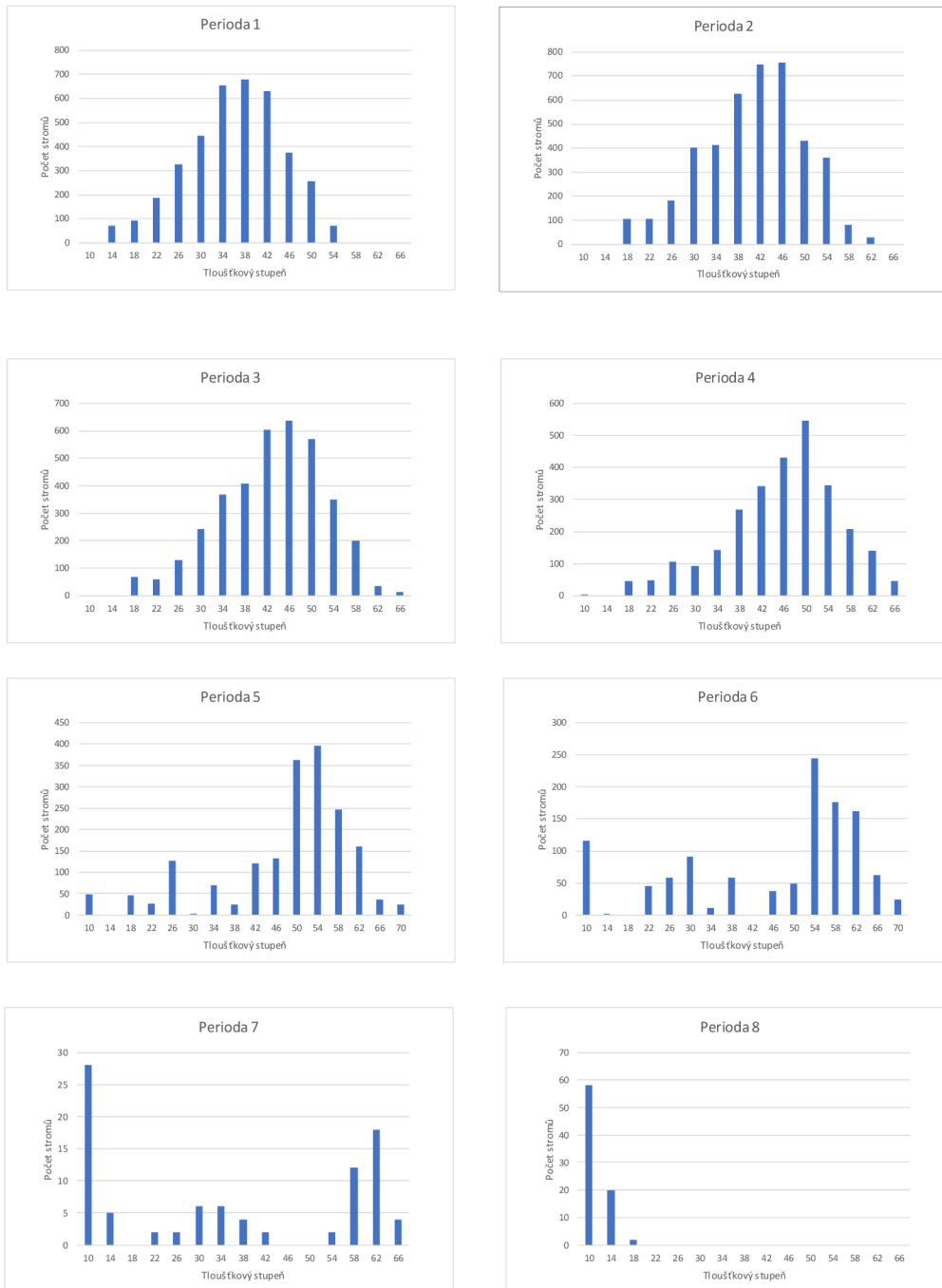


Graf 5.14 – plocha zásahů podle period – Model 510.2



Obrázek 5.22 – grafické znázornění řešení Modelu 510.2

Na obrázku 5.23 je zachycen vývoj tloušťkové struktury v průběhu obnovy porostu 510A10 podle Modelu 510.2. Tento vývoj je podobný jako v případě Modelu 510.1, ovšem v poslední periodě nejsou zastoupeny silnější tloušťkové třídy, jako je tomu v předchozím modelu. K tomuto dochází pravděpodobně vlivem pozdějšího započetí obnovy.



Obrázek 5.23 – Vývoj tloušťkové struktury porostu – Model 510.2

6. Diskuse

V současnosti se vede diskuse nad možnými změnami hospodaření v lesích jak v České republice zejména s ohledem na stav lesů po kůrovcové kalamitě, tak i ve světě zejména se zaměřením na globální změnu klimatu. Různí autoři se přitom shodují, že optimální hospodaření může vést ke zmírnění negativních klimatických jevů. Například Lohmander (2020) řešil optimalizační problém zabývající se obhospodařovanou plochou lesů ve vztahu k fixaci CO₂. Výsledkem tohoto výzkumu bylo, že za předpokladu konstantní produkce energie lze dosáhnout zvýšením plochy obhospodařovaného lesa zvýšení množství fixovaného CO₂, aniž by rostla potřeba fosilních paliv. Na tuto myšlenku musí ale navazovat stanovení toho, jak by měly být lesy obhospodařovány, aby byly schopny obstát v podmínkách měnícího se klimatu. Bauhus & Puettmann (2013) uvádí, že přírodě blízké postupy hospodaření mají potenciál na vytvoření komplexních a udržitelných lesů, které mohou obstát v měnících se ekologických podmínkách. Podle O'Hary (2016) ale k tomuto cíli nestačí pouhé napodobování přírodních procesů ale je potřeba se více zamýšlet nad vývojem podmínek a hospodaření tomu přizpůsobovat. Brang a kol. (2014) posuzovali schopnost hospodářských způsobů plnit šest adaptačních principů na klimatickou změnu. Posuzován byl jednotlivě výběrný, skupinovitě výběrný a podrovní hospodářský způsob, z nichž nejlepšího výsledku dosáhl skupinovitě výběrný hospodářský způsob. Tento výsledek i výše uvedená zjištění jsou v souladu s použitím skupinovitě podrovní obnovy porostu v této práci, která by mohla vést k převodu na skupinovitě výběrný les. Navržené postupy tedy mohou přispět i k adaptaci lesů na změnu klimatu.

Modely navržené v této práci, zejména modely v kapitole 5.2 a 5.3, zohledňují přístupy přírodě blízkého hospodaření zejména prostřednictvím dlouhé obnovní doby a skupinové podrovní obnovy porostů. Simulacemi se podařilo ověřit, že výsledné tloušťkové struktury budou mít po realizaci obnovy porostu podle modelem navrženého řešení tloušťkové struktury podobné tloušťkovým strukturám výběrného lesa. V tomto případě se jedná o určité zjednodušení, ovšem modely mají potenciál uplatnění pro navržení převodu lesa věkových tříd na les výběrný. Na takovéto modely mohou pak navazovat postupy zajišťující udržení tloušťkové struktury ve tvaru klesající „J“ křivky, které vytvořili například Gove a kol. (1995) nebo Pukkala a kol. (2010), jak bylo popsáno v kapitole 3.3.6.

Kromě pěstebních specifik byly navrženy také omezující podmínky zajišťující plnění environmentálních služeb lesa. Z tohoto hlediska jsou významné zejména podmínky dokončení obnovy, které podle svého nastavení umožňují ponechání určitých obnovních prvků bez obnovy. Kašpar a kol. (2015) navrhli model, který jednak minimalizoval výši zásoby na částech porostu bez těžby a zároveň také minimalizoval jejich obvod, což zajišťuje určitou celistvost těchto částí. Podmínky dokončení obnovy navržené v této práci celistvost ploch bez zásahu neumožňují. Vzhledem k tomu, že účelová funkce je zaměřena na maximalizaci vytěženého dříví, umožňují pouze nalezení obnovních prvků k ponechání s minimální zásobou. Navrženy byly varianty, které ponechávají obnovní prvky zcela bez těžby i varianty, které umožňují zásahy s ponecháním určitého množství dříví na vybraných obnovních prvcích. Předností této formulace podmínek je to, že umožňují snadno manipulovat s plochou ponechávanou bez zásahu prostřednictvím hodnoty n v podmínkách dokončení obnovy. Nevýhodou je, že pracuje pouze s počty zásahů. K většímu přizpůsobení realitě by mohlo dojít například při zanesení hodnot odrážejících ekologickou hodnotu jednotlivých obnovních prvků, což by ovšem vyžadovalo podrobnější data než je možné získat z LHP.

Určitým způsobem mohou k plnění environmentálních funkcí přispět také podmínky následnosti druhého typu, které byly navrženy v některých modelech. Podmínky následnosti prvního typu jednoduše zajišťují následnost zásahů po sobě v dalších periodách, ovšem podmínky následnosti druhého typu umožňují ponechávání period bez zásahu mezi periodami se zásahem. Toto specifikum vnáší do celé obnovy další potenciálně velkou míru variability. Ve většině modelů, kde byly tyto podmínky použity ale nedošlo k jejich uplatnění, v modelech, které byly vyhodnocovány s použitím simulací nebylo s těmito podmínkami pracováno kvůli případné komplikovanosti simulace při vynechávání period. K uplatnění podmínek by zřejmě došlo při prodloužení period zásahů. Prodloužení periody by vedlo k větším potenciální vyšším těžebním zásahům v pozdějších periodách a to by s sebou neslo snahu o posunutí části zásahů do pozdějšího věku. V kombinaci s podmínkami vyrovnanosti by tak mohlo dojít k zajímavému způsobu obnovy porostu, který by už mohl být poměrně komplikovaný. S prodloužením periody zásahů by souviselo prodloužení obnovní doby, která už by se mohla blížit nepřetržité obnovní době typické pro výběrný hospodářský způsob. Rämö & Tahvonen (2017) se zabývali optimalizací délky period zásahů v lesích s trvalým porostním pokryvem a došli k optimální délce mezi 10 a 25 lety. Konkrétní délka periody

podle autorů silně závisí na úrovni fixních nákladů na těžbu, výchozím stavu porostu a úrokové sazbě. S ohledem na toto zjištění by mohlo být zajímavé prodloužit periodu zásahů na 25 let a sledovat vývoj porostu (zejména tloušťkové struktury) při aplikaci obdobného modelu, jako byl použit v modelech 5, 6 a 510.

V některých modelech v této práci byly použity také podmínky vyrovnanosti těžeb, ovšem ve finálním modelu 510.1 musely být vynechány, jelikož znemožňovaly nalezení řešení. Podmínky byly definovány stejně, jako je definovali Öhman a Wikström (2008). Tito autoři podmínky ve svém modelu uplatnili s rozptylem mezi jednotlivými periodami $\pm 10\%$, což nebylo možné v modelech v této práci. Příčina toho byla v nedostatečném počtu obnovních prvků a požadavku na dokončení obnovy. Například v modelu 510.1 by bylo nutné vynechat požadavek na dokončení obnovy, aby mohly být použity podmínky vyrovnanosti s hodnotou A, která by měla smysl z praktického hlediska. Obnovní doba porostu by se tím ovšem adekvátně prodloužila. Öhman a Wikström (2008) ve svém modelu pracovali s větším počtem porostů, což umožnilo použití podmínek vyrovnanosti. Tito autoři také nepoužívali žádné podmínky zajišťující dokončení obnovy. Vzhledem k tomu, že modely v této práci byly zaměřeny na obnovu jednoho porostu, lze předpokládat, že celkové vyrovnanosti v rámci celého LHP by mohlo být dosaženo i bez podmínek vyrovnanosti aplikovaných na jednotlivé porosty. V tomto kontextu není vyrovnanost těžeb v rámci obnovy jednoho porostu důležitá a lze ji opomenout a upřednostnit pěstební specifika.

Postupy navržené v této práci navrhují způsob deduktivního stanovení výše těžeb a plánují postup obnovy porostu na základě dat přejatých z LHP. Ačkoliv v této práci byly modely aplikovány pouze na jeden porost, jejich použití na větších souborech porostů by bylo obdobné. Ve srovnání s běžně používanými těžebními ukazateli se jedná o přesnější metodu, která respektuje další různé omezující faktory a zohledňuje je při odvozování výše mytních těžeb. Při zkvalitnění vstupních dat je navíc možné přizpůsobit model i variabilitě zásoby po ploše porostu nebo jednotlivým dřevinám. Tím by bylo možné přiblížit se přesností induktivnímu stanovení výše těžeb za současné úspory času vyplývajícího při induktivním způsobu z nutných terénních prací.

7. Závěr

Na základě poznatků rozebraných v kapitole 3 byly vytvářeny modely lineárního programování zaměřené na optimalizaci mýtní těžby přírodě blízkým způsobem hospodaření. Bylo vytvořeno 7 modelů, z nichž některé měly další dílčí varianty. Modely byly sestavovány z různých omezujících podmínek a bylo sledováno jejich chování v komplexu modelu a jejich vliv na výsledné řešení. Některé podmínky byly přejaty z již existujících prací a některé byly nově vytvořeny. Všechny modely byly zaměřeny na maximalizaci výše těžeb.

Byly vytvořeny omezující podmínky zajišťující specifické rozmístění zásahů, systematiku následování jednotlivých zásahů, vyrovnanost těžby nebo například také podmínky umožňující zohlednit environmentální požadavky. Tyto podmínky byly zakomponovány do modelů, což vedlo v konci k aplikaci modelu na reálný porost.

První vytvořené modely sloužily především k ověření funkčnosti podmínek a byly poměrně jednoduché. V dalších modelech byla zvyšována jejich komplexita na základě předchozích a přidávány další podmínky zohledňující další faktory mající vliv na plánování obnovy porostu. V případě složitějších modelů byly provedeny aplikace na počítačově simulované porosty a vyhodnoceny tloušťkové struktury během obnovy porostu podle řešení modelu. Do modelů zaměřených na reálný porost vstupovala data z LHP a taktéž bylo provedeno vyhodnocení na simulacích.

Modely byly navrhovány většinou především pro podrostní skupinovou obnovu porostů. Model pro reálný porost byl vytvořen také ve variantě pro velkoplošnou podrostní obnovu o pěti zásazích. Pomocí simulací se podařilo ověřit, že tloušťková struktura porostu po obnově podle postupu navrženého řešením modelu by byla tvaru klesající „J“ křivky a do budoucna by se mohla vyvíjet do tloušťkové struktury podobné výběrnému lesu za předpokladu dalších adekvátních opatření.

Vytvořené podmínky, modely i další související postupy dávají předpoklad pro jejich další využití při tvorbě postupů zaměřených na optimalizaci mýtních těžeb pro přírodě blízké postupy hospodaření. Tyto postupy umožňují zohlednit při plánování specifická pěstební opatření a případně také další požadavky z hlediska ekosystémových služeb. V konečném důsledku by to mohlo vést ke změně přístupu k plánování mýtních těžeb v České republice na komplexní přístup zohledňující různé požadavky společnosti

a zajišťující optimální a udržitelné nakládání s lesy při zachování všech služeb, které plní a také zajištění ekonomické funkčnosti lesního hospodářství.

8. Seznam literatury a použitých zdrojů

2020. ZPRÁVA O STAVU LESA A LESNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2019. Praha: Ministerstvo zemědělství, Těšnov 17, 110 000 Praha I. ISBN 978-80-7434-571-5.

BANAŚ, Jan, Stanislaw ZIEBA a Leszek BUJOCZEK, 2018. An Example of Uneven-Aged Forest Management for Sustainable Timber Harvesting. *Sustainability*. **10**(9). ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su10093305

BAUHUS, Jürgen a Klaus PUETTMANN, 2013. Close-to-Nature Forest Management in Europe: Does It Support Complexity and Adaptability of Forest Ecosystems. *Managing Forests as Complex Adaptive Systems: building resilience to the challenge of global change*. 187-213. Dostupné z: doi:10.4324/9780203122808

BETTINGER, P., K. BOSTON, J. SIRY a D. GREBNER, 2009. *Forest Management and Planning*. Elsevier. ISBN 978-0-12-809476-1.

BRANG, Peter, Peter SPATHELF, J. Bo LARSEN, et al., 2014. Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry*. **87**(4), 492–503.

BUONGIORNO, J. a J. K. GILLES, 2003. *Decision methods for forest resource managers*. 1. Amsterdam: Boston: Academic press. ISBN 0121413608.

D'AMOURS, Sophie, Mikael RÖNNQVIST a Andres WEINTRAUB, 2017. Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*. **46**(4), 265-281. ISSN 0315-5986. Dostupné z: doi:10.3138/infor.46.4.265

DAVIS, L.S., K.N. JOHNSON, P. BETTINGER a T. E. HOWARD, 2005. *Forest management : to sustain ecological, economic, and social values*. Boston: McGraw Hill. ISBN 0-07-032694-0.

DUNCKER, Philipp S., Susana M. BARREIRO, Geerten M. HENGEVELD, Torgny LIND, William L. MASON, Slawomir AMBROZY a Heinrich SPIECKER, 2012. Classification of Forest Management Approaches: A New Conceptual Framework and Its Applicability to European Forestry. *Ecology and Society*. **17**(4). ISSN 1708-3087. Dostupné z: doi:10.5751/ES-05262-170451

EPSTEIN, Rafael, Ramiro MORALES, Jorge SERÓN a Andres WEINTRAUB, 1999. Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries. *Interfaces*. **29**(1), 7-29. ISSN 0092-2102. Dostupné z: doi:10.1287/inte.29.1.7

EPSTEIN, R., A. WEINTRAUB, J. KARLSSON a M. RÖNNQVIST, 2007. Harvest operational models in forestry. WEINTRAUB, A., T. BJORNALD a R. EPSTEIN. *Handbook of operations research in natural resources*. Springer, s. 365-377.

FABRIKA, M. a J. ĎURSKÝ, 2005. Algorithms and software solution of thinning models for SIBYLA growth simulator. *Journal of Forest Science*. **51**(10), 431-445.

GOVE, Jeffrey H., Ganapati P. PATIL a Charles TAILLIE, 1995. A mathematical programming model for maintaining structural diversity in uneven-aged forest stands with implications to other formulations. *Ecological Modelling*. **79**(1-3), 11-19. ISSN 03043800. Dostupné z: doi:10.1016/0304-3800(94)00044-I

GUNN, Eldon A., 2007. Models for Strategic Forest Management. *Handbook Of Operations Research In Natural Resources*. Boston, MA: Springer US, 317-341. International Series In Operations Research amp; Mana. ISBN 978-0-387-71814-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-0-387-71815-6_16

HILLIER, F.S. a G.J. LIEBERMAN, 2010. *Introduction to Operations Research*. 9th. New York: McGraw-Hill. ISBN 0072321695.

JOHANN, E., 2006. Historical development of nature-based forestry in Central Europe. In: DIACI, Jurij. *Nature-Based Forestry in Central Europe: Alternatives to Industrial Forestry and Strict Preservation*. Ljubljana: Biotechnical Faculty, University of Ljubljana, s. 1-17. ISBN 978-961-6020-44-2.

JOHNSON, K. a H. SCHEURMAN, 1977. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives—Discussion and synthesis. *Forest Science*. **23**, 1-31. Dostupné z: doi:10.1093/forestscience/23.s1.a0001

KAŠPAR, Jan a Róbert MARUŠÁK, 2020. *Basic principles of spatial harvest optimization in forest management: Základní principy prostorové optimalizace těžeb v lesním hospodářství*. Edition 1st. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-3013-9.

KAŠPAR, Jan, Róbert MARUŠÁK a Robert HLAVATÝ, 2015. A Forest Planning Approach with Respect to the Creation of Overmature Reserved Areas in Managed Forests. *Forests*. **6**(12), 328-343. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f6020328

KONOSHIMA, M., R. MARUŠÁK a A. YOSHIMOTO, 2011. Harvest scheduling with spatial aggregation for two and three strip cut system under shelterwood management. *Journal of Forest Science*. **57**, 271–277. Dostupné z: doi:10.17221/48/2010

KOROSUO, Anu, Tero HEINONEN, Karin ÖHMAN, Hampus HOLMSTRÖM a Ljusk Ola ERIKSSON, 2014. Spatial Optimization in Forest Planning Using Different Fragmentation Measures. *Forest Science*. **60**(4), 764-775. ISSN 0015-749X. Dostupné z: doi:10.5849/forsci.13-074

LOHMANDER, Peter, 2020. Fundamental principles of optimal utilization of forests with consideration of global warming. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*. (3), 134-142. Dostupné z: doi:10.22034/CAJESTI.2020.03.02

MARTELL, David L., Eldon A. GUNN a Andres WEINTRAUB, 1998. Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*. **104**(1), 1-17. ISSN 03772217. Dostupné z: doi:10.1016/S0377-2217(97)00329-9

MARUŠÁK, Róbert a Jan KAŠPAR, 2015. Spatially-constrained harvest scheduling with respect to environmental requirements and silvicultural system / Prostorové plánování mýtních těžeb zahrnující environmentální požadavky a hospodářské způsoby. *Forestry Journal*. **61**(2), 71-77. ISSN 0323-1046. Dostupné z: doi:10.1515/forj-2015-0015

MURRAY, A.T., 1999. Spatial Restrictions in Harvest Scheduling. *Forest Science*. **45**, 45-52.

NAVON, D.I., 1971. Timber RAM, a long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management. *U.S. Forest Service Research Paper*.

O'HARA, K.L., 2015. What is close-to-nature silviculture in a changing world? *Forestry*. **89**(1), 1-6. Dostupné z: doi:10.1093

ÖHMAN, Karin a Peder WIKSTRÖM, 2008. Incorporating aspects of habitat fragmentation into long-term forest planning using mixed integer programming. *Forest Ecology and Management*. **255**(3-4), 440-446. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2007.09.033

PAPPS, S.R. a B.R. MANLEY, 1992. *Integrating Short-Term Planning with Long-Term Forest Estate Modeling Using EOLPI.: Integrating Forest Information over Space and Time*. Canberra, Austria, 188-198.

PRO SILVA, 2012. *Pro Silva principles*. Pro Silva - Association of European Foresters Practicing Management which follows Natural Processes.

PUKKALA, T., E. LAHDE a O. LAIHO, 2010. Optimizing the structure and management of uneven-sized stands of Finland. *Forestry*. **83**(2), 129-142. ISSN 0015-752X. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/cpp037

RÄMÖ, Janne a Olli TAHVONEN, 2017. Optimizing the Harvest Timing in Continuous Cover Forestry. *Environmental and Resource Economics*. 67(1), 853–868.

RÖNNQVIST, Mikael, Sophie D'AMOURS, Andres WEINTRAUB, et al., 2015. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research*. **232**(1), 11-40. ISSN 0254-5330. Dostupné z: doi:10.1007/s10479-015-1907-4

SPATHELF, Peter, Andreas BOLTE a Ernst MAATEN, 2015. Is Close-to-Nature Silviculture (CNS) an adequate concept to adapt forests to climate change? *Landbauforsch*. **65**(3), 161-170. Dostupné z: doi:10.3138/infor.46.4.265

THOMPSON, Emmett F., Bernard G. HALTERMAN, Tunis J. LYON a Robert L. MILLER, 1973. Integrating timber and wildlife management planning. *The Forestry Chronicle*. **49**(6), 247-250. ISSN 0015-7546. Dostupné z: doi:10.5558/tfc49247-6

VAŠÍČEK, Jaromír, 2018. Vývoj hospodářské úpravy lesů. *Lesnická práce*. **97**(7), 32-37. ISSN 0322-9254.

Sibyla Triquetra, 2022. Sibyla Triquetra [online]. Zvolen: Technická univerzita Zvolen [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: <http://sibyla.tuzvo.sk/index.html>

Vyhláška o lesním hospodářském plánování, 1996. In: . Praha: Ministerstvo zemědělství, ročník 1996, číslo 84.

Koncepce státní lesnické politiky do roku 2035, 2020. Praha.

Přílohy

Příloha č. 1 – model 510.1

Model je uveden ve zkrácené podobě, ponechány jsou pouze počáteční a koncové části jednotlivých dílů modelu.

Maximize

9 u11 +

7 u21 +

10 u31 +

...

89 z218 +

59 z228 +

63 z238

Subject To

sousednost: u11 + u21 <= 1

sousednost: u11 + u31 <= 1

sousednost: u21 + u61 <= 1

sousednost: u31 + u41 <= 1

...

sousednost: z198 + z208 <= 1

sousednost: z208 + z218 <= 1

sousednost: z218 + z228 <= 1

sousednost: z228 + z238 <= 1

naslednost: u11 - v12 = 0

naslednost: $u_{21} - v_{22} = 0$

naslednost: $u_{31} - v_{32} = 0$

...

naslednost: $y_{217} - z_{218} = 0$

naslednost: $y_{227} - z_{228} = 0$

naslednost: $y_{237} - z_{238} = 0$

neopakovani: $u_{11} + u_{12} + u_{13} + u_{14} + u_{15} + u_{16} + u_{17} + u_{18} \leq 1$

neopakovani: $u_{21} + u_{22} + u_{23} + u_{24} + u_{25} + u_{26} + u_{27} + u_{28} \leq 1$

neopakovani: $u_{31} + u_{32} + u_{33} + u_{34} + u_{35} + u_{36} + u_{37} + u_{38} \leq 1$

...

neopakovani: $z_{215} + z_{216} + z_{217} + z_{218} \leq 1$

neopakovani: $z_{225} + z_{226} + z_{227} + z_{228} \leq 1$

neopakovani: $z_{235} + z_{236} + z_{237} + z_{238} \leq 1$

vyrovnanost:

$$9 u_{11} + 7 u_{21} + 10 u_{31} + 9 u_{41} + 8 u_{51} + 6 u_{61} + 5 u_{71} + 6 u_{81} + 8 u_{91} + 8 u_{101} + 6 u_{111} + 10 u_{121} + 6 u_{131} + 5 u_{141} + 6 u_{151} + 7 u_{161} + 4 u_{171} + 8 u_{181} + 7 u_{191} + 9 u_{201} + 9 u_{211} + 6 u_{221} + 6 u_{231} - T_1 = 0$$

...

dokonceni_obnovy:

$u_{11} +$

$u_{21} +$

$u_{31} +$

...

$z_{218} +$

$z_{228} +$

$z_{238} = 115$

Generals

u11

u21

u31

...

z218

z228

z238

T1

...

T8

End